

Klimawandel in der Erdvergangenheit und Gegenwart

Pott, Richard

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 59, 2007,
S.73-109



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Klimawandel in der Erdvergangenheit und Gegenwart*

RICHARD POTT

Institut für Geobotanik, Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 17, D-30167 Hannover

1. Einleitung

Als die sieben drängendsten Umweltprobleme der heutigen Zeit gelten Klimawandel, globale Umwelteinwirkungen von Chemikalien, wie beispielsweise Ozonabbau, Gefährdung der Weltmeere durch Eutrophierung und Überfischung, Verlust biologischer Vielfalt und Entwaldung, Bodendegradation und Süßwasserverknappung beziehungsweise Wasserverschmutzung und Wassermangel. Eingriffe in natürliche Ökosysteme haben heute zum Teil Ausmaß und Charakter von Naturgewalten angenommen. So ist der CO₂-Gehalt der Lufthülle seit Beginn der industriellen Revolution des 19. Jahrhunderts stark angestiegen. Mit dem Thema „Klimawandel“ wollten wir uns jetzt befassen:

Klimawandel war immer. Wir wissen schon seit Charles Darwin (1809-1882), dass sich alles Leben auf der Erde in ständiger Anpassung an diesen Wandel vollzogen hat. Doch im Spiel mit der Angst der Menschen wird der Klimawandel immer neu und in anderen Varianten als „Neue Bedrohung“ für den Globus und die Menschheit dargestellt. Das geschieht insbesondere immer dann, wenn Umweltgipfelkonferenzen zu diesem Thema einberufen werden, denn gerade inmitten der aktuellen Klimadiskussion über das Kyoto-Protokoll von 1997 und seine Umsetzung – zum Beispiel nach Berlin 1999, Rio de Janeiro 2000, Den Haag 2000, Johannesburg 2002, Buenos Aires 2004, Nairobi 2006, Heiligendamm 2007 und Bali 2007 werden die komplexen Fragen der Ursachen und Prognosen von Klimaveränderungen sowie der Klimaentwicklung insgesamt global behandelt und die bislang bekannten Fragen resümiert. Viele verantwortungsbewusste Menschen weisen auf die derzeit so wichtige Problematik hin und betonen auch, dass nicht allen Bürgern und politischen Entscheidungsträgern die Grenzen der derzeit verfügbaren Klimamodelle, die meist als

* (Eingegangen 13.03.2008) Der Vortrag wurde am 20.11.2006 anlässlich des Symposiums „Global change und biologische Invasionen“ der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft und des Instituts für Geobotanik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover gehalten.

Computersimulationen vorliegen, in ihren Dimensionen und in ihren Wirklichkeitsbezügen verständlich, nachvollziehbar und bewusst sind.

Liegen wir in der Kohlendioxid-Diskussion richtig – ist das CO₂ ein quasi-finales Giftgas modernen Wirtschaftens? Wie forciert Wasserdampf, das wichtigste Treibhausgas überhaupt, unsere Klimaerwärmung? Die entscheidende Frage ist dabei die nach den Folgen. Ist es möglich, dass wir uns mit unseren Abgasen in eine neue Warmzeit heizen, in der die Binneneisvorkommen in der Antarktis oder in Grönland schmelzen, flache Inseln untergehen und das Marschenland der Nordsee wieder überflutet wird? Oder ist die menschgemachte Erhöhung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre im Rahmen des komplizierten Wechselspiels der vielen natürlichen Vorgänge nur ein kleiner Ausrutscher, der ohne große Folgen für das Klima bleibt mit all den beobachteten Konsequenzen: Die weitere Verringerung der arktischen Meereisdecke, das Abbrechen großer Tafeleisberge von den Eisschelfen der Antarktis, der Rückgang der alpinen Gletscher, das Tauen des Permafrosts in den Gebirgen und in der Arktis, der langsam steigende Meeresspiegel und die biogeographischen Veränderungen der marinen und terrestrischen Lebensräume oder gar das Herannahen zukünftiger Warm- oder Eiszeiten.

Alle die mit dem Thema Klima zu tun haben, sind sich weitgehend einig, dass wir derzeit einen Klimawandel erleben. Ist der nun hausgemacht, also von Menschen verursacht, oder natürlich, also ein normales Phänomen der „gottgewollten“ Klimaschwankungen auf unserer Erde, die wir ja für die geologische Erdvergangenheit zu allen Zeiten und Perioden nachvollziehen und wissenschaftlich mit Warm- und Kaltzeiten belegen können? Will der amerikanische Präsident George W. Bush die Welt in die oftmals prognostizierte „Klimakatastrophe“ oder schlechthin in ihr Verderben stürzen, oder ist er hinsichtlich der Ratifizierung der „Kyoto-Protokolle“ schlichtweg wissenschaftlich besser beraten oder hat er in Heiligendamm beim Weltwirtschaftsgipfel des Jahres 2007 plötzlich dazugelernt oder ist das alles nur eine „politische Taktik“?

Welche Auswirkungen diese Phänomene in ihrem Zusammenwirken für die Ökosysteme der Erde, für die Pflanzen und die Vegetation insgesamt haben, wird zunehmend Bedeutung in der künftigen vegetationsökologischen Forschung erlangen. Interessant dabei ist, dass sich schon im Laborversuch die Menge an Kohlendioxid, das in die Pflanze bei der Photosynthese aufgenommen wird, noch steigern lässt, wenn mehr Kohlendioxid angeboten wird als derzeit in der Luft mit circa 0,036 Volumenprozent vorhanden ist. Bei Verdoppelung des derzeitigen Gehaltes nimmt die photosynthetische Produktion von komplexen organischen Verbindungen, den Assimilaten, aber nicht zu. Im gärtnerischen Pflanzenbau hat man sich diesen Effekt der Kohlendioxid-Düngung schon lange zunutze gemacht. Bei einem Anstieg des Kohlendioxidgehalts der Luft profitieren davon in erster Linie die C₄-Pflanzen. Sie können eine höhere Photosyntheseleistung erzielen und leiden weniger unter Wassermangel. Unse-

re Pflanzen klassifizieren wir heute in C_4 - und C_3 -Metaboliten. Bei ersteren enthält das erste während der Photosynthese gebildete Produkt vier Kohlenstoffatome, bei letzteren hingegen drei. Die C_4 -Pflanzen, zu denen die tropischen Gräser gehören, setzen viel mehr vom Isotop Kohlenstoff-13 in organisches Material um als die C_3 -Pflanzen. In diese Gruppe fallen die Bäume und Büsche im tropischen Wald und in der Savanne. C_4 -Pflanzen der Savannen beispielsweise ziehen dagegen nur wenig Nutzen aus einem größeren CO_2 -Angebot, da sie bereits das Kohlendioxid sehr wirkungsvoll nutzen. Ob und wie dieses Phänomen auch in der freien Natur funktioniert und wie sich die Ökosysteme unter dem Einfluss der erhöhten Kohlendioxidemissionen verändern, ist recht ungewiss.

Der Klimawandel ist also ein hochaktuelles Thema: So behandeln auch am 6.11.2006 Stefan Dietrich in seinem Leitartikel der Frankfurter Allgemeinen Zeitung (FAZ) und der Spiegel, Nr. 45 vom gleichen Tag dieses Thema: Der vielfach geäußerte Gedanke, man müsse den Klimawandel durch Reduktion der anthropogenen Emission „stoppen“, spricht Bände für den allgemeinen Kenntnisstand der Bevölkerung und vieler Journalisten, für den Charakter technokratischer und politischer Selbstüberschätzung und gleichzeitig für das erstaunlich geringe Wissen oder gar das Unverständnis der Natur. Manche Menschen versteigen sich sogar darin, das Weltklima „manipulieren“ zu können und zu wollen. Müssen wir nun das „Klima“ schützen, um unsere Erde und uns vor einem Kollaps zu bewahren oder reicht es, nur den Menschen vor sich selbst und seinen Versuchungen zu schützen? Wer beherrscht das Spiel mit der Angst am besten, um ständig in der Öffentlichkeit präsent zu sein, oder wer hat die besseren und wirksameren Erklärungen zum aktuellen Klimawandel, aus dem sich effektive und nachhaltige Lösungen ableiten lassen? Gibt es eine „Klimakatastrophe“ oder sind negative klimatische Einwirkungen nicht nur „katastrophal“ für zivilisatorische Konstruktionen des kultivierten Menschen und seinen Bauten und Einrichtungen, welche durch natürliche Katastrophen beschädigt oder zerstört werden? Das wollen wir in diesem Vortrag beleuchten:

2. Szenarien des Klimawandels

Mit mächtigen Presseinszenierungen hat sich die Weltklimakonferenz von 2006 in Nairobi damals angekündigt: Der frühere amerikanische Vizepräsident Al Gore präsentierte einen aufrüttelnden, suggestiven Film „Eine unbequeme Wahrheit“, der deutsche Umweltminister Siegmund Gabriel rief danach die „Dritte industrielle Revolution“ aus und erklärte die Klimaschutzpolitik zum Angelpunkt aller künftigen Probleme des 21. Jahrhunderts. Der britische Premier Toni Blair belegte mit schwindelerregenden Zahlen, dass unsere derzeitige klimapolitische Ignoranz der Weltgemeinschaft eine neue Weltwirtschaftskrise bescheren werden, die mit 5500 Milliarden Euro teurer sein wird, als alle Kriege und Krisen

zuvor. Der ehemalige Weltbankdirektor Sir Nicholas Stern – einer der angesehensten Ökonomen der Erde – berechnete sogar diese ökonomischen globalen Folgen künftiger Hurrikane, Überschwemmungen und Dürrekatastrophen mit den genannten 5500 Milliarden oder 5.5 Billionen Euro pro Jahr. Sir Nicholas Stern hat ein Phänomen beziffert, dass sich die meisten Menschen in Zahlen und Ziffern gar nicht vorstellen können: 5.5 Billionen Euro könnte es also kosten, wenn die Menschheit weiterhin so gewaltige Mengen von Klimagasen in die Atmosphäre pumpt. Das sind 20 Prozent ihrer gesamten Wirtschaftskraft. Der Makroökonom N. Stern sagt: „Der Klimawandel ist das größte Marktversagen, das es je gab.“

Welche hausgemachten, anthropogenen Anteile an diesem Prozess haben wir denn wirklich, oder welche natürlichen Schwankungen des Klimas erleben wir derzeit? Die in letzter Zeit sprunghaft gestiegene Zahl der Erdenbewohner auf derzeit über 6 Milliarden Menschen spricht für den Menschen und seine Aktivitäten als ökologischen Einflussfaktor. Schon die exzessive Ausweitung der Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen, die in der westlichen Welt im Laufe des 19. Jahrhunderts begonnen hat und in neuerer Zeit auf China, Indien und Indonesien überspringt, kann nicht ohne Folgen bleiben. Alles Kohlendioxid, das durch Verbrennung fossiler organischer Substanz in der Atmosphäre deponiert wird, kann deren Zusammensetzung verändern: Das wissen wir seit Charles David Keeling (1928-2005).

Europa hat sich sofort dieser Verantwortung mit dem Kyoto-Prozess gestellt. Inzwischen wissen wir aber auch, dass längst nicht alles, was das Kyoto-Gütesiegel trägt, auch klimafreundlich ist. Von den hochsubventionierten Windrädern und Wind- oder Solarkraftwerken, die nur im Zusammenwirken mit Gasturbinen verlässlich Strom liefern können, profitieren bislang nur die Betreiber und Aktionäre solcher Anlagen. Amerika konzentriert inzwischen seine Anstrengungen darauf, den Prozess der Photovoltaik zu synthetisieren, mit dem die Natur organische Substanzen aus Lichtenergie schafft, welche sich zudem seit Jahrmillionen bei der Fossilisierung als Erdöl oder Erdgas aus Biomasse anreichert. Sollte es bald gelingen, einen großen Teil des Energiehungers klimaneutral zu stillen, wären die Amerikaner jetzt allen anderen Kyoto-Staaten weit voraus.

Der FAZ-Herausgeber Joachim Müller-Jung schreibt ebenfalls am 6. November 2006 im Feuilleton dieser Zeitung: „Europa glaubt an Umweltpolitik, Amerika verhöhnt sie“ ... und bringt damit die derzeitige Diskussion auf den Punkt: „Paradoxe Weise sieht sich dieses Anti-Kyoto-Bündnis mit Australien, Korea, China, Indien und Japan genau von jener ökonomischen Vernunft beseelt, die in der Analyse des schon erwähnten Briten Nicholas Stern als die eigentliche und größte Bedrohung der zivilisierten Welt beschrieben wird: Tokio und Yokohama, Schanghai, New York, Miami, Kalkutta und viele kleine Pazifikinseln drohen in den nächsten Jahrzehnten immer öfter überflutet zu werden, schreibt Stern. Die Auswahl der Katastrophenorte ist nie zufällig: 200 Millionen Menschen und mehr könnten wegen des Meeresspiegelanstiegs und der bedrohten

Küsten bei einer durchschnittlich zwei bis drei Grad wärmeren Welt bis zur Mitte des Jahrhunderts zur dauerhaften Emigration gezwungen sein; bis zu vierzig Prozent der Pflanzen- und Tierarten könnten aussterben, nicht zuletzt wegen der drohenden Austrocknung der Amazonas-Regenwälder; ein Kollaps der Eisschilde werde mit zunehmender Erwärmung vier Millionen Quadratkilometer Küste überfluten und damit ein Zwanzigstel der Weltbevölkerung zur Landflucht bewegen; Hunderte Millionen Menschen speziell in Afrika, würden gleichzeitig unter der Last der Dürren nicht mehr genug Nahrung produzieren können...“

Es gibt offenbar keinen Zweifel, dass sich das Klima der Erde zur Zeit in einer Phase des schnellen Wandels befindet. Wir haben es gesehen; bei näherer Prüfung der Informationen, die zu diesem gesamten Problemkreis zur Verfügung stehen, stellt sich jedoch heraus, dass die Gründe für die beobachtete globale Erwärmung keineswegs klar sind und das der vermutete menschliche Einfluss in enger Wechselwirkung mit der natürlichen Veränderlichkeit des Klimas steht. Die jetzt registrierte Erwärmung der Erde hat sich offenbar im Takt mit der zunehmenden Industrialisierung über die letzten 150 Jahre entwickelt, nachdem eine mehrere hundert Jahre andauernde kalte Klimaphase, die sogenannte „Kleine Eiszeit“, die auf der nördlichen Hemisphäre von ca. 1450 bis 1780 besonders ausgeprägt war, zu Ende ging und sich die Durchschnittstemperaturen wieder auf die nacheiszeitlichen Mittelwerte einstellten, die sie aber in den letzten 20 Jahren machmal überschritten.

3. Klima und Wetter

Klima ist nach der geographisch-naturwissenschaftlichen Definition „die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsbedingungen während eines längeren Zeitraumes in charakteristischer Verteilung der häufigsten mittleren und extremen Werte“. So hat es der Klimatologe Joachim Blüthgen (1966) definiert. Noch eines muss vorangestellt werden: Klima und Wetter sind Begriffe, die wir auseinanderhalten sollten: Das Klima betrifft das großräumig-langfristige Geschehen; Wetter beinhaltet die kurzfristigen, lokalen, also an einem Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt wirksamen Kombinationen der atmosphärischen Elemente, wie zum Beispiel feuchte und trockene Sommer, kalte oder milde Winter, Hoch- und Tiefdruckgebiete während der Jahreszeiten, etc. Langfristig bilden die Witterungsfaktoren, also die Wetterabläufe, die jeweiligen Klimafaktoren. Diese messbaren Einzelercheinungen zur Charakterisierung des Klimas sind Strahlung, Luftdruck, Luftfeuchte, Temperatur, Wind, Verdunstung, Niederschlag und Bewölkung. Alle diese sogenannten Klimaelemente werden registriert, gesammelt, und für längere Zeiträume, im Regelfall mindestens 30 Jahre, nach Mittelwerten, Häufigkeiten und Abfolgen von Extremen ausgewertet. Klima ist



Abb. 1: Vegetationszonen der Erde (nach SCHMITHÜSEN 1976).

also die „Synthese des Wetters über einen dreißigjährigen Zeitraum“, das ist die derzeit gültige Definition. So werden für bestimmte Großräume der Erde Makroklimare definiert, wonach entsprechend den allgemeinen großklimatischen Bedingungen verschiedene Klimate oder Klimazonen erdweit existieren:

- polare und arktische Klimate des Ewigen Frostes und der Tundren,
- boreal-montane, winterfeuchte und wintertrockene Klimate,
- gemäßigte, feuchttemperierte Klimate,
- mediterranoide, warme, sommertrockene Steppenklimate,

- subtropische, warme wintertrockene Klimate, Wüstenklimate und
- tropische Savannen- und Regenwaldklimate.

Klimazonen sind großräumige Gebiete der Erde, in denen die Klimabedingungen gleichartig sind. Klimazonen sind demnach im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen auf der Erdoberfläche und die damit verbundene allgemeine Zirkulation der Atmosphäre bedingt. Da sich die natürliche Vegetation den Klimaten sehr eng anpasst, zeigen Klimazonen und Vegetationszonen eine weitgehende Parallelität (Abb.1). Das ist eine Grundsäule der Geobotanik, die ich als Lehrgebiet an der Leibniz Universität Hannover vertrete. Deshalb wird dieses auch hier erwähnt, denn die Klimageschichte, das heißt der durch die Paläoklimaforschung bekannte Ablauf des räumlichen und zeitlichen Wechsels der Klimabedingungen in erdgeschichtlicher Zeit, zum Beispiel die Klimaschwankungen im Verlauf der pleistozänen Eiszeiten und deren Vegetationswandel sind heute unsere essentiellen Forschungsdisziplinen, wie sie bei POTT (2005) und POTT & HÜPPE (2007) beschrieben sind.

In der Kreidezeit, als die Saurier lebten, entwickelte die Atmosphäre etwa zehnmal mehr Kohlendioxid als heute. Und was die Sonne angeht: Die eingetragene Sonnenenergie kann sich aus verschiedenen Gründen ändern: Entweder durch die Schwankungen in der Leuchtkraft der Sonne oder durch Änderungen in der Erdbahn. Die Leuchtkraft der Sonne schwankt in Abhängigkeit von den Sonnenfleckenzyklen, damit verbundene Klimaveränderungen lassen sich mehrfach nachweisen: Die Sonne ist nicht massiv wie die Erde, sie besteht aus Gas und ungefähr 70 Prozent sind Wasserstoff, 28 Prozent Helium und zwei Prozent schwere Elemente. Die äußere sichtbare Schicht der Sonne, die Photosphäre, ist also ein aus positiv geladenen Kernen und freien negativen Elektronen zusammengesetztes Gasgemisch, das man Plasma nennt. Wie jedes geladene Objekt erzeugt auch das Plasma Magnetfelder, wenn es sich bewegt. Elektrische Ströme entstehen durch Verlagerung solcher Felder, und Eruptionen oder Sonnenflecken sind die Folge davon. Sonnenflecken bilden sich, wenn Bündel von Magnetfeldlinien durch die Oberfläche der Sonne brechen. An diesen Stellen sind die Magnetfelder am stärksten. Plasma und Magnetfeld sind also ständig in Bewegung. Die Quelle dieser Energie ist die Kernfusion. Denn wie alle Sterne entstand auch die Sonne durch die Vereinigung von Gasen, die sich unter dem Einfluss der Gravitation zu einem Ball verdichteten. Die Masse wurde schließlich so groß, dass die Wasserstoffatome unter dem gigantischen Druck verschmolzen, wobei sie Helium und freie Neutronen bildeten. Diese Reaktionsprodukte haben zusammen weniger Masse als die Wasserstoffkerne, aus denen sie entstanden sind. Nach Albert Einsteins (1879-1955) berühmter Formel $E = mc^2$ wird der Unterschied in pure Energie umgewandelt. Diese Einstein-Gleichung von der Energie-Masse-Relation besagt, dass die Gleichwertigkeit von Energie = E und Masse = m eines physikalischen Systems, vor allem von Teilchen, relativ ist zur Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = c.

Auf unserer Erde wäre jegliches Leben ohne die Sonne undenkbar. Wie weit aber ihr Einfluss und die Bedeutung der solaren Aktivität für den Klimawandel geht, ist umstritten. Es gibt Wissenschaftler, die glauben, dass Schwankungen in der Sonnenaktivität für das irdische Klima maßgeblich sind. Dieser Himmelskörper ist ein Klimafaktor ersten Ranges, und die Rolle der Sonne als „Energiefabrik“ ist immens. Sie strahlt nicht gleichmäßig wie eine Glühbirne, sondern ihre verschiedenen Sonnenfleckenzyklen und die Zwischenzeiten geringerer Aktivitäten, die Interferenzen, haben offenbar das Klima auf der Erde bis in die jüngste Zeit bestimmt. Johannes Fabricius (1587-1615), ein Medizinstudent aus Osteel bei Norden in Ostfriesland, und sein Vater David Fabricius (1564-1617), der dortige Pastor, entdeckten im Jahre 1611 hier vom mächtigen Kirchturm aus durch ein Fernrohr die Sonnenflecken zum ersten Mal. Das sind dunkle Stellen in der Lichthülle der Sonne, die in einem elfjährigen Zyklus auffälligste Anzeichen einer wechselnden Sonnenaktivität sind. Dunkle Flecken auf der Oberfläche der Sonne sind zuvor mehrfach im Mittelalter beobachtet worden. Damals hielt man sie für hochfliegende Vögel oder für Planeten, die vor unserem Zentralgestirn manchmal vorbeiflogen. Dass es sich um Erscheinungen der Sonne selbst handelt, wissen wir erst durch den Universalgelehrten Galileo Galilei (1564-1642), der sie gleichzeitig mit den Herren Fabricius und mit Thomas Harriot (1560-1621) aus England beobachtete und aus deren allmählicher Bewegung über die Sonnenscheibe schon damals richtig auf die Rotation der Sonne schloss. Diese Beobachtungen widersprachen seinerzeit teilweise dem an der aristotelischen Lehre ausgerichteten Weltbild. Aber erst 1843 hat der deutsche Astronom Samuel Heinrich Schwabe aus Dessau (1789-1875) erkannt, dass sich die Häufigkeit der Flecken gleichsam periodisch ändert. Er begann 1826 damit, eine Strichliste zu führen, und 1843 gab er bekannt, dass ihre Zahl im Laufe von etwa zehn Jahren von einem Minimum über ein Maximum auf die Ausgangswerte zurückgeht. Alle durchschnittlich elf Jahre kehrt die Sonne ihre magnetische Polarität um: Der Nordpol wird zum Südpol und umgekehrt. Ein kompletter Sonnenzyklus dauert demnach im Durchschnitt 22 Jahre. Der engere Aktivitätszyklus beträgt ungefähr elf Jahre und wird deshalb auch als Schwabe-Zyklus entsprechend so bezeichnet.

Über längere Zeiträume ist die Aktivität der Sonne mal generell besonders hoch und dann eine Zeitlang wieder ausgesprochen niedrig. Dies kann man messen an der beobachteten Häufigkeit der Sonnenflecken, die so genannten Fleckenrelativzahlen, die ein Maß für die solare Aktivität sind, denn die Sonne ist zur Zeit ihres Maximums der „Dunklen Flecken“ heller als während des Fleckenminimums. Während des so genannten Maunder-Minimums in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts wurden gar keine Sonnenflecken beobachtet. Das Maunder-Minimum ist benannt nach seinem Entdecker: Der britische Astronom Edward Maunder (1851-1928) untersuchte 1890 die historisch beobachteten Sonnenflecken und wies auf eine „Pause“ in den elfjährigen Zyklen zwischen 1645 und 1720 hin – eine Epoche, die auffällig mit dem Ende der „Kleinen Eiszeit“ zu-

sammenfällt. Seit den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts ist die Fleckenrelativzahl dagegen ungewöhnlich hoch, sie liegt derzeit bei ungefähr 75 und manchmal sogar geringfügig darüber, und man erwartet das Maximum bis zum Jahre 2011.

Eine ebenso wichtige Bedeutung haben die Unregelmäßigkeiten der Erdbahn um die Sonne, die mit den sogenannten Milankovitch-Zyklen belegbaren Änderungen der Konstellationen zwischen Sonne und Erde, welche wir nachfolgend genauer betrachten wollen. Sie sind Ursache für die seit zwei Millionen Jahren nachgewiesenen Eiszeitzyklen, die sich etwa alle 100000 Jahre wiederholen. Auch die Änderungen der Monsunzirkulation, die unter anderem die Trockenheit der Sahara und der innerasiatischen Wüsten bestimmen, werden hiermit inzwischen erklärt.

4. Klimafakten und Klimawandel

Menschliches Handeln hat bislang offenbar zu einem weiten Effekt globalen Ausmaßes geführt: Die Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre beispielsweise durch das Verbrennen fossiler Kohlenstoffe oder als Folge der Abholzung von natürlichen Wäldern haben den Anteil an Kohlendioxid (CO_2) dermaßen erhöht, dass innerhalb des nächsten Jahrhunderts mit einer erdweiten Änderung des Klimas und einer globalen Erwärmung der Erdoberfläche von deutlich mehr als einem Grad Celsius als Folge des Treibhauseffekts zu rechnen ist. Auf der Erde ist die Verbreitung von Tier- und Pflanzenarten hauptsächlich durch Klimaparameter bestimmt, und es wird angenommen, dass Änderungen der Temperatur oder der Niederschläge auch die Ausdehnung der Großlebensräume beeinflussen. In jüngster Zeit häufen sich Berichte über Verhaltensanpassungen von Pflanzen und Tieren und sich ändernde Artareale als Folge der wärmeren Klimabedingungen der vergangenen drei Jahrhunderte. Nachdem im vergangenen Jahrhundert die durchschnittliche Temperatur der Erdatmosphäre weltweit um rund 0,6 Grad Celsius angestiegen ist, rechnen Klimaexperten für die kommenden Jahre mit einer noch stärkeren Erwärmung, die naturraumabhängig negative oder positive Konsequenzen für Land- und Forstwirtschaft sowie für die Siedlungsflächen der Menschen in ökologisch sensiblen Regionen wie beispielsweise dem Nordseeraum haben kann.

Wärmere Temperaturen treiben aber auch den globalen Wasserkreislauf an. Dies äußert sich in zunehmend verstärkten Trockenzeiten oder Hochwasserereignissen in verschiedenen Teilen der Erde. Der Meeresspiegel steigt gegenwärtig um 2,4 Millimeter pro Jahr mit wahrscheinlicher Zunahme, wenn das Abschmelzen der Gletscher und Polkappen voranschreitet. Bis ins Jahr 2100 soll sogar mit einem Anstieg des mittleren globalen Meeresniveaus von 0,09 bis 0,88 Metern gerechnet werden. Kürzlich konnte obendrein eine Korrelation zwischen erhöhter

Nordatlantischer Wellenoszillation und ansteigender Oberflächentemperatur nachgewiesen werden. Verschiedene Modelle weisen ferner darauf hin, dass auch mit einer verstärkten Niederschlagsintensität und einer Zunahme an Extremereignissen gerechnet werden muss, wie dies seit 1992 in den Berichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nachzulesen ist. Hier ist jedoch Einhalt zum Nachdenken geboten: Zahlreiche Faktoren beschränken nach wie vor unsere Fähigkeiten und Möglichkeiten, eventuelle Folgen einer zukünftigen Klimaveränderung wirklich aufzudecken und konkret abschätzen zu können. Eines ist jedenfalls klar, die Zusammensetzung der Vegetationsdecke in einem Naturraum, wie zum Beispiel im Wattenmeer oder auf den Inseln, hängt einmal von den Migrationsraten der Pflanzen und Tiere ab und zum anderen davon, wie rasch sich in diesem Kontext die Bodenverhältnisse und andere Umweltfaktoren ändern. Es ist zum heutigen Zeitpunkt in keiner Art und Weise gesichert, ob die Wanderungskapazitäten der Pflanzen und Tiere mit der Rate der sich ändernden Umweltbedingungen Schritt halten können und dass derzeit beobachtete Veränderungen in der Vegetation einzelner Regionen wirklich und ursächlich dem „Global-Warming-Phänomen“ zugeordnet werden dürfen.

Einigkeit besteht jedoch darin, dass der aktuelle Temperaturanstieg zumindest teilweise auf die Verbrennung fossiler Energieträger, vor allem von Kohle und Erdöl, durch den Menschen und das dabei freiwerdende Kohlendioxid zurückzuführen ist. Das Problem: In der Erdatmosphäre nimmt das Kohlendioxid die Wärmestrahlung der Erde auf und zwar speziell den Wellenbereich, der von der Erde zurückgestrahlt wird, nachdem sie von der Sonne aufgewärmt wurde. CO_2 wirkt dabei wie das Glasdach eines Treibhauses: Es lässt das kurzwellige, von der Sonne einfallende Licht passieren, absorbiert aber die irdische Infrarotstrahlung. Wie wichtig jedoch der anthropogene Beitrag für die Entstehung des sogenannten Treibhauseffektes und der daraus postulierten Klimaerwärmung im Vergleich zu natürlichen Klimavarianten wirklich ist, bleibt derzeit eine wichtige Frage.

Paläoklimatologen diskutieren bislang ständig Zweifel an einem ausschließlich anthropogenen Klimawandel, betonen aber auch, dass der Einfluss des modernen Menschen auf eine globale Erwärmung durch die Emission von Treibhausgasen nicht vollkommen auszuschließen ist. Es ist darüber hinaus schon lange bekannt, dass die Wissenschaftler mit geologischem oder paläoökologischem Hintergrund bei der oftmals in den letzten Jahren prognostizierten Klimaentwicklung, die heute mit den Schlagworten „Global Warming“ oder „Klimakatastrophe“ belegt sind, mit Extrapolationen von Daten seit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert schon immer eher zurückhaltend waren.

Es ist außerdem hinlänglich bekannt, dass der Klimawandel seit dem Präkambrium, also seit 3 Milliarden Jahren, mit sich ständig verändernden Klimazonen in globaler Sicht sowie mit immer wiederkehrenden Warm- und Kaltphasen offenbar Spielart einer „gottgewollten Ordnung“ ist, der wir ungezählte

zyklische oder periodische Klimaveränderungen mit wiederkehrenden Abkühlungen und Erwärmungen in manchen Regionen der Erde verdanken. So wissen wir heute durch zahlreiche Messwerte, so genannte Paläoklima-Proxydaten, dass sich die Erde seit etwa 2,6 Millionen Jahren im quartären Eiszeitalter befindet und dass unser Globus seither allein in dieser Phase mindestens 20 Kaltzeiten erlebt hat, wobei die sie trennenden Warmzeiten jeweils rund zehnmal kürzer waren als die Kaltzeiten. Selbst innerhalb der Kaltzeiten gab es Zwischenwarmzeiten, die das raue Klima kurzzeitig etwas freundlicher erscheinen ließen. Diese Klimaschwankungen sind jedes Mal deutlich in zahlreichen Pollendiagrammen mit entsprechenden Vegetationsschwankungen repräsentiert. Auf der nördlichen Hemisphäre wuchsen während der Eiszeiten gigantische Inlandeisschilde, die weite Gebiete Nordamerikas und Eurasiens bedeckten, die aber in den Warmzeiten wieder abschmolzen. Der heute noch vorhandene grönländische Eisschild ist ein solcher Rest, der bei weiterer Erwärmung in Zukunft auch noch schmelzen kann. Während der Eiszeiten wurde über den atmosphärischen Wasserkreislauf durch Verdunstung und Niederschlag dem Weltmeer so viel Wasser entzogen, dass der weltweite Meeresspiegel um bis zu 140 Meter absinken konnte. Gegen Ende einer Eiszeit wurde das in den Eisschilden gespeicherte Wasser nach deren Abschmelzen wieder dem Ozean zugeführt, was damals zu weiträumigen und dramatischen Überschwemmungen der Küstenzonen führte.

Die Grundlagen dafür sind mit den so genannten „äußeren“ und „inneren“ Klimafaktoren zu beschreiben: Die Sonne ist ein Klimafaktor ersten Ranges, und ihre Rolle als „Energiefabrik“ ist immens: Sie strahlt – wie gesagt – nicht gleichmäßig wie eine Glühbirne, sondern ihre verschiedenen Sonnenfleckenzyklen und die Zwischenzeiten geringerer Aktivität, die Interferenzen, haben offenbar das Klima auf der Erde bis in allerjüngste Zeit bestimmt. Wir haben bereits gesehen, dass die dunklen Stellen in der Lichthülle der Sonne in elfjährigen Zyklen auffälligste Anzeichen einer wechselnden Sonnenaktivität sind. Auch die Wirkungen der globalen Land-Meer-Verteilung heute und in der Erdvergangenheit sowie die Verschiebung der Kontinente hatten entsprechende Folgen für das Klima, und sie sind weiterhin fundamentale Bestandteile von Klimaänderungen. Solche Klimaschwankungen mit ihren Wechseln von Warm- und Kaltzeiten bilden somit einen besonders wertvollen Aspekt der neuen Klimaforschung: Wir kennen nun in groben Zügen die natürlichen klimatischen Grundphänomene und die Rolle des Menschen in der jetzigen Nacheiszeit, also im Holozän, für Nordwesteuropa. Aus historisch-globaler Sicht wissen wir ferner, dass die Konzentration des Kohlendioxids im Erdaltertum teilweise deutlich höher war als heute. Das trifft auch für geologische Epochen zu, in denen sich die großen Eisschilde von den Polen her ausbreiteten, so etwa im Karbon und im Perm vor 360 bis 290 Millionen Jahren, während der so genannten permo-karbonischen Vereisung. Darüber hinaus belegen die Rekonstruktionen von Temperatur und Kohlendioxid, dass atmosphärischer Kohlendioxidgehalt und die Lufttemperatur über die letzten Millionen Jahre hinweg nicht immer im Gleichschritt verliefen.

In Anbetracht unseres zunehmenden Wissens um die Bedeutung beispielsweise des jüngst ins Spiel gebrachten Wasserdampfes als Treibhausgas kommt dem neu diskutierten Paradigmenwechsel von der bisherigen Nutzung fossiler Energieträger zur künftigen Nutzung und Verwendung von Wasserstoff als vorherrschendem Brenngas eine besondere Bedeutung zu: Dabei sollte man in der Diskussion auch die Erkenntnisse der Meteorologen nutzen, die vermuten, dass die Hälfte des heute freigesetzten Wasserdampfes aus der in großen Höhen der Atmosphäre ablaufenden chemischen Umwandlung des Spurengases Methan stammt. Wir wissen es inzwischen sehr gut: Die Zunahme des Wasserdampfes hat heutzutage gleich zwei ungünstige Auswirkungen; zum einen begünstigt eine feuchte Atmosphäre in großen Höhen die Bildung von Eiskristall-Wolken oder sogenannten polaren stratosphärischen Wolken. An den Eiskristallen laufen die chemischen Reaktionen ab, die zur Zerstörung der Ozonschicht führen. Nimmt der Wasserdampf also weiter zu, ist damit zu rechnen, dass sich das Ozonloch über der Antarktis und möglicherweise auch die Ozonverluste über der Nordhalbkugel trotz eingeleiteter Gegenmaßnahmen nicht wie erwünscht zurückbilden, sondern womöglich im Gegenteil bedrohlicher werden. Zum anderen absorbiert der zunehmende Wasserdampf mehr Wärme. Im Gesamtsystem der Atmosphäre ist also der Wasserdampf mit mehr als 66 Prozent ein entscheidender Faktor für die Speicherung von Wärmeenergie, gefolgt von Kohlendioxid und Ozon mit je 15 Prozent und den weiteren Treibhausgasen Stickoxide (0,14 Prozent), FCKW (0,28 Prozent), Methan (0,47 Prozent) sowie übrigen Gasen mit einem Gesamtvolumen von etwa 5 Prozent. Welche Auswirkungen diese Phänomene im Einzelnen in ihrem Zusammenwirken für das Klima, die Klimaänderungen und deren Konsequenzen auf die Erde insgesamt haben, wird zunehmend bedeutsamer.

5. Milankovitch-Zyklen

Notwendig ist also die Rekonstruktion der Klimavergangenheit mit Ausblicken in die Zukunft: Wir stehen offenbar am Anfang einer außergewöhnlich langen Warmzeit. Sie ist durch die geringe Änderung der Sonneneinstrahlung in den nächsten 50000 Jahren bedingt, vorprogrammiert durch die Konstellation zwischen Erde und Sonne. In den frühen Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts erkannten Wissenschaftler wie Alfred Wegener (1880-1930) und Milutin Milankovitch (1879-1958), dass die steten Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten durch kleine Wechsel in der Geometrie der Erdbahn um die Sonne beeinflusst oder gesteuert werden. Damals tauchten die ersten Vermutungen über Zusammenhänge mit den periodischen Änderungen der Erdbahn und der Stellung der Erdachse auf. Die langfristigen, wiederkehrenden Änderungen der Sonneneinstrahlung im Rahmen von mehreren 10000 Jahren wurden erstmals vom genannten serbischen Mathematiker M. Milankovitch im Jahre 1941

beschrieben. Solche Milankovitch-Zyklen lassen sich aus astronomischen Gesetzmäßigkeiten für Vergangenheit und Zukunft berechnen.

Damals veröffentlichte Milankovitch sogenannte „Strahlungskurven“ für einzelne Breitenkreise im Ablauf der Erdgeschichte, also Angaben über die Schwankungen der eingestrahnten Sonnenenergie aufgrund der erwähnten periodischen Veränderungen. Diese ergeben sich durch die wandelnde Stellung unseres Planeten und des Erdmondes zueinander und damit der Änderung der Anziehungskräfte untereinander. Als Erdbahnelemente werden im Allgemeinen für die Berechnung herangezogen: Die Neigung der Erdachse zur Umlaufbahn um die Sonne ist die Ursache für die Jahreszeiten. Sie ändert sich mit einer Periode von 41000 Jahren zwischen 21,5 Grad und 24,5 Grad und liegt heute bei 23,4 Grad. Sie nimmt zur Zeit ab, so dass sich die Unterschiede zwischen Sommer und Winter verstärken. Bei der Präzession legt man fest, dass die Erdachse einer Tumbelbewegung unterliegt – eine Halbachse umschreibt dabei einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von 47 Grad. Überlagert wird diese Bewegung durch eine Rotation der Umlaufellipse der Erde um die Sonne. Daraus ergeben sich zwei unterschiedliche Perioden: 23000 und 19000 Jahre. Bei der sogenannten Exzentrizität wird berechnet, dass die Erde die Sonne nicht exakt auf einem Kreis umläuft. Die größte Abweichung ihrer elliptischen Umlaufbahn vom Kreis beträgt 6 Prozent und wird alle 10000 Jahre erreicht (Abb.2).

Ferner ist die Erdbahn in hohen geographischen Breiten durch den Neigungswinkel der Erdrotationsachse gegenüber der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, die sogenannte Obliquität, geprägt, während in niederen Breiten der Einfluss von den Änderungen des Ellipsenradius der Erdumlaufbahn um die Sonne, die Exzentrizität, und die entsprechende Strahlungsenergie durch den Abstand von Sonne und Erde überwiegen. Die sogenannten Orbitalparameter, wie die Ellipsenform der Erdbahn um die Sonne, der Winkel der Rotationsachse der Erde in dieser Bahn und die Präzession der Erdrotation, ergeben regelmäßige Änderungen für Frequenzen von 100000, 41000, 23000 und 19000 Jahren, die in Wechselwirkung stehen, in ihrer Summe aber offensichtlich einen steuernden Einfluss auf das Klima der Erde haben. Diese Wechsel können mit modernen geologischen und paläoökologischen Messungen erfasst und durch Astronomen auch für zurückliegende Zeiten berechnet werden (Abb. 3). Es gibt keinen Grund anzunehmen, dass diese langfristigen, zyklischen Wechsel in Zukunft ausbleiben werden. Alle Berechnungen deuten ferner darauf hin, dass die jetzige Warmzeit mit dem Einstrom des für Nordwesteuropa und für die Nordsee so wichtigen Golfstroms in den nördlichen Nordatlantik noch lange Zeit andauert, bis sie dann mit wesentlich kälteren Klimaten in eine neue Eiszeit übergeht. So ist nach den derzeitigen astronomischen Modellen eine nächste starke Abkühlung des Klimas erst in etwa 50000 Jahren zu erwarten. Ähnlich der „Achterbahnfahrt“ des Klimas in der jüngsten Vergangenheit während der letzten Weichselzeit vor etwa 22000 bis 18000 Jahren bewegen wir uns also danach auf eine

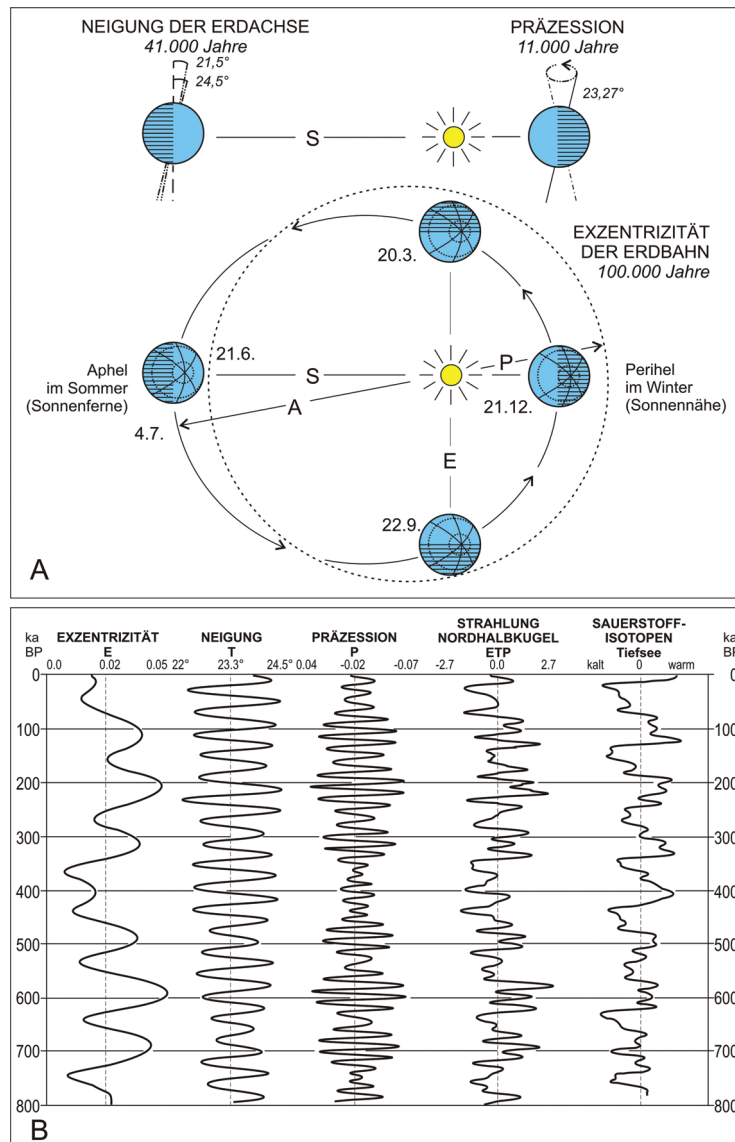


Abb. 2: A: Erdbahnelemente und ihre Änderungen, wobei die Darstellung der Schwankungen der Exzentrizität (E) überhöht ist (aus Pasenau 2002). B: Perioden der Erdbahnelemente und die Strahlungskurven (ETP) auf der Nordhalbkugel in den letzten 800 000 Jahren. Das Kürzel kaBP bedeutet *Kiloyears Before Present*, also Tausend Jahre vor heute. Die Abbildung zeigt den Vergleich zu den Kalt-Warm-Tendenzen nach den Ergebnissen von Sauerstoffisotopenuntersuchungen von fünf Tiefseesedimentprofilen aus den verschiedenen Ozeanen der Erde (nach PASENAU 2002).

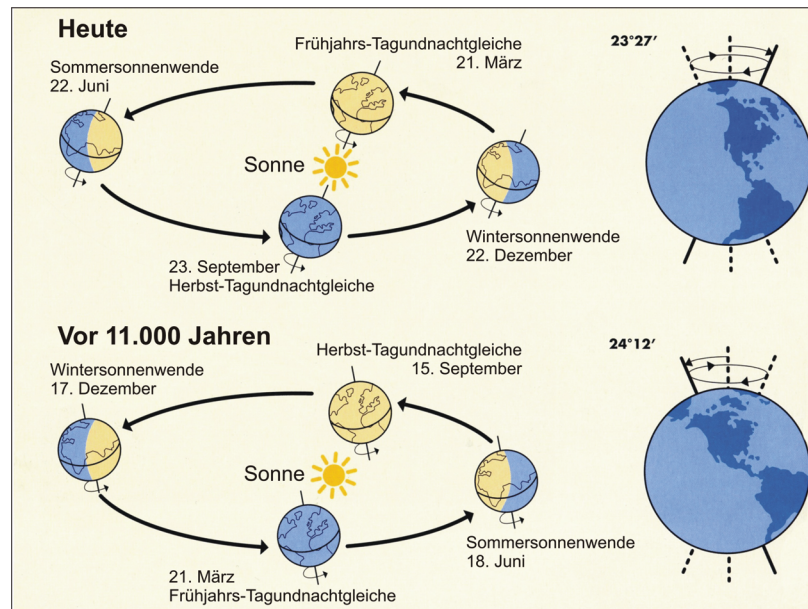


Abb. 3. Veränderung der Präzession zwischen dem Ende der letzten Eiszeit vor 11.000 Jahren und heute (nach IMBRIE et al. 1985).

neue Kaltzeit zu, und zwar unabhängig davon, ob die Menschheit heute die Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre durch die Verbrennung von Erdöl, Erdgas und Kohle erhöht. Um Missverständnissen vorzubeugen: Auch wenn der Kohlendioxid-Beitrag für die Klimaveränderungen weit schwächer sein sollte als oftmals befürchtet, so ist doch ein vernünftiger Umgang mit den Ressourcen der Erde unabdingbare Voraussetzung für den Erhalt einer gesunden Umwelt.

6. Rekonstruktionen von Temperaturverläufen

Mit modernen Untersuchungsmethoden ist es inzwischen gelungen, solche Änderungen im Strahlungshaushalt der Erde nachzuweisen. So untersucht man beispielsweise das Verhältnis der beiden Sauerstoffisotope O^{16} und O^{18} in kalkhaltigen Meeressedimenten. Das Meerwasser besteht hauptsächlich aus Wassermolekülen mit dem weit verbreiteten Sauerstoffisotop O^{16} . Nur 0,2 Prozent des Wassers enthält dagegen „schwere“ Sauerstoffatome mit der Massenzahl O^{18} . Beim Verdunsten des Meerwassers werden die leichteren Moleküle eher aufsteigen. Wird also während einer Kaltzeit vermehrt Meerwasser in Form fester Nie-

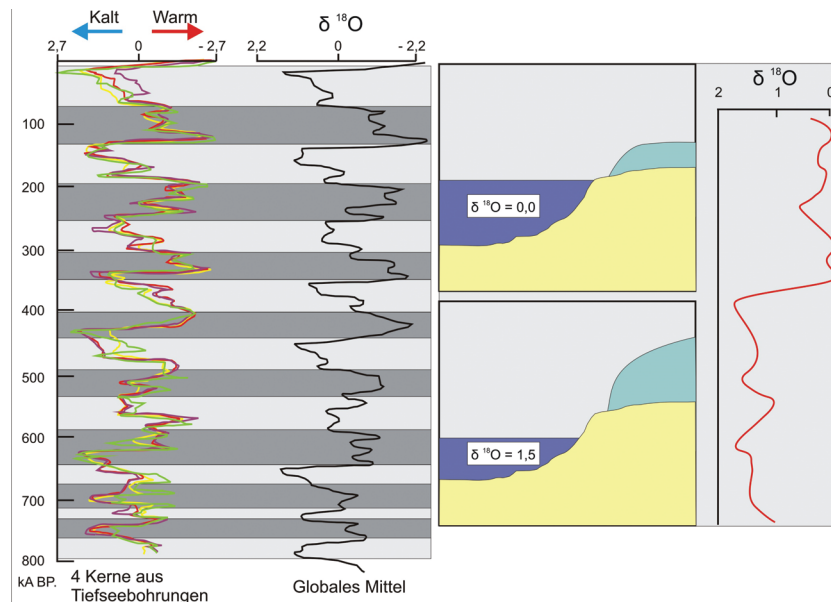


Abb. 4: Zur Rekonstruktion der Temperaturen misst man delta-O¹⁸-Sauerstoffisotope, deren Anteile in Kaltzeiten ansteigen (verändert nach IMBRIE et al. 1985).

derschläge mit Schnee und Eis an den Polen gebunden, erhöht sich allmählich der Meerwassergehalt an O¹⁸. Untersucht man nun die Proben von Tiefseesedimenten oder aus den Eiskernen Grönlands auf ihren Sauerstoffisotopengehalt, so kann man anhand der O¹⁶/O¹⁸-Relation nachträgliche Informationen über die vergangenen Temperaturverläufe finden (Abb. 4). Überraschenderweise kann man in nahezu allen geeigneten Sedimenten, ob im Norden oder im Süden des Globus, fast identische Ergebnisse finden. Man hatte erwartet, dass durch periodische Schwankungen der Erdschneigung auch deutliche Unterschiede in der Temperaturverteilung zwischen Nord- und Südhalbkugel der Erde auftreten würden. Man vermutet, dass die Koppelung der fast gleichzeitigen Abkühlung von Nord- und Südhemisphäre unter anderem über ein heute recht gut erforschtes übergreifendes ozeanisches Strömungssystem – wie inzwischen beim Golfstrom erkannt – mit entsprechenden kalten Tiefenströmungen, die ihren Ursprung im Nordatlantik haben, und oberflächennahen wärmeren Ausgleichsströmungen von Süden schon immer erfolgte.

Mit den Ergebnissen vieler paläoökologischer Untersuchungen und dem Vergleich der Temperatur- und Altersbestimmung an Tiefseesedimenten sowie durch die Analyse von Eiskernen aus Grönland und der Antarktis kann man für Nord- und Mitteleuropa seit etwa 1,7 Millionen Jahren insgesamt sieben Eiszeiten

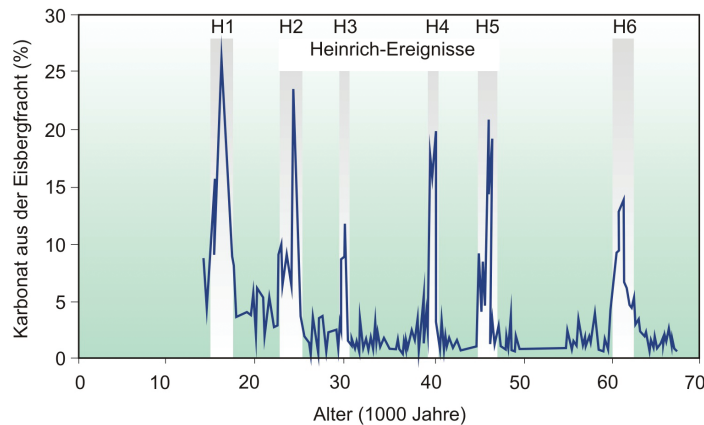


Abb. 5. Eistransportiertes Material in den Ablagerungen des Atlantiks aus dem Tiefsee-Bohrprojekt (Bohrung 609) nach Angaben von BERNER & STREIF (2001) (aus POTT 2003).

nachweisen. Die drei letzten sind für die Nordsee von besonderer Bedeutung; deshalb werden sie nachfolgend auch ausführlich beschrieben.

Während der „Kleinen Eiszeit“ ging wegen der rasch vordringenden Meer-eisdecken im Europäischen Nordmeer die Verbindung nach Grönland zu den mittelalterlichen Wikingersiedlungen verloren, und der Fischfang vor Norwegen – eine der wichtigsten Voraussetzungen für das Aufblühen der Hanse – brach zusammen. Die Untersuchungen aus den grönländischen Eiskernen haben uns ferner gelehrt, dass dramatische natürliche Klimawechsel über Zeiträume von wenigen Jahren bis Jahrzehnten ablaufen können. So weiß man heute, dass seit dem Ende der letzten Warmzeit, der Eem-Warmzeit, vor 117000 Jahren in regelmäßigen Zeitabständen von etwa 10000 bis 20000 Jahren die Eisschilde in Kanada und Grönland in stärkere Bewegung geraten sind und dabei eine „Flotte“ von Eisbergen in den Nordatlantik geschoben haben. Beim allmählichen Abschmelzen der Eisberge rieselten die groben, vom Eis mitgeführten Sedimente und Gesteinspartikel, sogenannte „*drop-stones*“, auf den Meeresboden. Ihre Spuren lassen sich anhand dieses Schutts rekonstruieren und datieren, sie werden als „Heinrich-Ereignisse“ bezeichnet (Abb. 5). Tatsächlich haben Meeresgeologen in den letzten Jahrzehnten nach Untersuchungen aus den Eiskernen Grönlands zahlreiche Belege für solche Ereignisse, sogenannte „Heinrich-Lagen“ entdeckt. Die Spur der Eisberge, die „Heinrich-Lagen“, sind also Gesteinsschutt, der, in Gletschereis eingefroren, vom Eis über die Kontinente hinaus bis ins Meer verfrachtet wurde. Die „Heinrich-Lagen“ sind jeweils am Ende von Zeitabschnitten mit niedrigen Temperaturen des oberflächennahen Seewassers beziehungsweise niedrigen Lufttemperaturen aufgetreten.

Solche Ablagerungen sind dementsprechend Ausdruck von Zeiten eines schnellen Zerfalls von Teilen der damaligen Eisschilde auf der Nordhemisphäre und des Abkalbens zahlreicher Eisberge. Diese schnellen Gletschervorstöße und -rückzüge spiegeln das hohe Tempo der Klimaänderungen innerhalb der letzten kalten Phasen des Quartärs wider. Alle vorliegenden Hinweise der nacheiszeitlichen Klimaänderungen weisen ferner darauf hin, dass das Klimaoptimum im Atlantikum vor 8000 bis 7000 Jahren durch wesentlich höhere Temperaturen und auch durch einen höheren Meeresspiegel als heute geprägt war und weltweit für Mensch, Tier und Pflanzen günstige Lebensbedingungen bestanden. Die damaligen Meeresstransgressionen führten zum Einbruch des Ärmelkanals, machten England zur Insel und ließen den Wattenmeer-Naturraum mit seinen veränderlichen Barriereinseln entstehen.

7. Meeresspiegelschwankungen

Welche enormen Wassermassen während einer Eiszeit in den Inlandeismassen der damaligen über 3000 Meter dicken Eisschilde gebunden waren, wird klar, wenn man das oft beschriebene Abschmelzen der heutigen Polkappen berechnet. Heute betragen die gesamten Süßwasservorräte der Erde etwa 37 Millionen Kubikmeter; davon sind 30 Millionen Kubikmeter im Inlandeis gebunden. Die beiden Eisschilde der Antarktis und Grönlands enthalten davon rund 99 Prozent des gesamten Eisvorrates der Erde, die andern Gletscher zusammengenommen nur ca. 1 Prozent. Ein vollständiges Abschmelzen der heutigen Eismassen würde den Meeresspiegel weltweit um über 70 Meter anheben. Im Atlantikum hat dieses damals offenbar sehr schnell und dramatisch stattgefunden: Genau vor 8600 bis 7100 Jahren ist auch die Nordsee – die wir wegen ihres sehr guten Untersuchungsstandes hier beispielhaft behandeln – von ehemals 45 Metern auf 15 Meter unter dem heutigen Niveau angestiegen. Die durchschnittliche Anstiegsrate hat in dieser Zeit etwa zwei Meter pro Jahr betragen (Abb. 6).

Traditionell wird der Meeresspiegel an Pegelstationen gemessen, die teilweise schon seit hundert Jahren und länger Messdaten liefern. Diese Messstationen sind aber sehr ungleich über die Erde verteilt, denn die meisten befinden sich auf der Nordhalbkugel. Da sich die aus diesen Messungen abgeleiteten Trends teilweise widersprechen und außerdem große Meeresgebiete unbeobachtet bleiben, waren die bis heute darauf basierenden verfügbaren Aussagen über den globalen Meeresspiegelanstieg früher überaus unsicher. Durch neue Fernerkundungssatelliten wird seit den neunziger Jahren die Situation zunehmend verbessert, und die Änderungen des Meeresspiegels werden seitdem weltweit auf wenige Millimeter genau gemessen. Es zeigt sich ein Anstieg des globalen Meeresspiegels mit einem leichten Aufwärtstrend und starken Jahresgängen. Diese werden durch den Kreislauf des Süßwassers verursacht: Wasser verdunstet über dem Meer und kehrt als Niederschlag und über die Flüsse in den Ozean

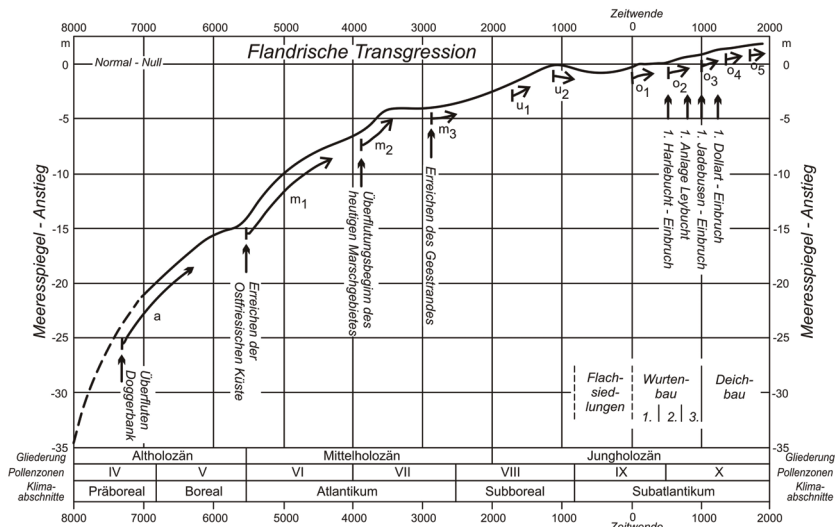


Abb. 6: Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels für den Raum Wilhelmshaven im Holozän (nach Behre 1987, 1991). G: Großbritannien wird vom Festland getrennt; J = erster Salzwassereinfluss an der Jade; F = Flachsiedlungsperiode vor der Zeitenwende; W1 und W2 = Perioden mit Wurtenbesiedlung. Altersangaben nicht in tatsächlichen Kalenderjahren, sondern in Radiocarbonjahren.

zurück. Schnee und Eis sowie wechselnde Grundwasserspiegel dienen dem Süßwasser als Zwischenspeicher und verzögern den Rückfluss ins Meer.

Computersimulationen der globalen Meeresströmungen helfen mittlerweile, die Ergebnisse der Satellitenmessungen und die Ursachen der Meeresspiegeländerungen zu verstehen. Der oben beschriebene Süßwasserkreislauf und die physikalische Ausdehnung des Wassers bei Temperaturanstiegen begründen die globalen Änderungen. So hat es nachweislich eine größere Anzahl über die Eis-Wasser-Bilanz der Erde gesteuerter Meeresspiegelschwankungen gegeben, die auch in den Ablagerungen der Nordsee und des norddeutschen Küstenraumes dokumentiert sind. Während der Phasen extremer Abkühlung der letzten Kaltzeit, der Weichselvereisung, die vor 117000 bis 11000 Jahren stattfand, sank der Meeresspiegel sogar bis 140 Meter tief ab, so dass die Küstenlinie der Nordsee damals ca. 360 Kilometer nördlich der Doggerbank lag. Nach dieser Kaltzeit und nach dem Schmelzen der Gletscher kehrte die Nordsee allmählich zurück und eroberte die Küste erneut (Abb. 7).

Nach dem Einbruch des Ärmelkanals vor genau 8300 Jahren während des Klimaoptimums im Atlantikum konnten auch mit dem Golfstrom warme Wassermassen aus dem Atlantik vermehrt in das Nordseebecken gelangen; sie dringen



Abb. 7: Verlauf der Nordseeküstenlinien in der ausgehenden Eiszeit um 10300 vor heute (verändert nach Pasenau, Bleichle & Fansa 2002). Das Nordseebecken war bis über die Doggerbank trocken gefallen; der nachfolgende Meeresspiegelanstieg ließ allmählich den südlichen Nordseeraum «ertrinken».

heute sogar entlang der norwegischen Küste bis in die Grönlandsee vor, während kaltes Oberflächenwasser entlang der Küste Grönlands nach Süden strömt. Mit den heutigen Strömungen gelangen also wärmere salzreiche Wassermassen des Nordatlantiks in das Nordmeer und über die nordatlantikspezifischen Gezeitenwellen weiter bis in die südliche Nordsee. Sie fließen entlang des norwegischen Schelfhanges und Spitzbergen bis in den Arktischen Ozean, haben als „Warmwasserheizung Westeuropas“ einen maßgeblichen Einfluss auf das Klima und sind bislang stabil. Unser gemäßigtes Klima verdanken wir dem Golfstrom (Abb. 8). Ohne ihn hätten wir strenge Winter und wärmere Sommer. Was aber treibt die wärmeren Wassermassen aus den Seegebieten am Äquator entlang der amerikanischen Ostküste nach Norden? Kann diese Warmwasserheizung Europas infolge des „Global Warmings“ abbrechen und zu einer dramatischen Klimaänderung führen? Das sind Fragen, deren Erörterung man heute schon außerhalb der Fachliteratur in der Tagespresse findet.

8. Meeresströmungen

Im Seegebiet um Island findet sich die ständige Pumpe, die den Golfstrom beeinflusst und damit die vom Wind bestimmte Strömungsrichtung begünstigt.



Abb. 8: Wasseraustausch von kalt nach warm: Der weltweit vernetzte Golfstrom ist unsere «Klimamaschine» (aus POTT 2003).

Dort sinkt abgekühltes Oberflächenwasser auf den Ozeangrund ab und fließt als Tiefenwasser nach Süden (Abb. 8). Das ist der Massenausgleich für das warme Oberflächenwasser des Golfstroms. Entscheidend für das Absinken des Oberflächenwassers ist der Salzgehalt des Meereswassers. Je mehr Salz im Wasser gelöst ist, desto schwerer wird es, sinkt also leichter ab. Die „Klimapumpe“ arbeitet dann entsprechend kräftiger, weil mehr warmes Wasser nach Norden fließt. Sinkt der Salzgehalt nur geringfügig, wird weniger Tiefenwasser gebildet, so dass der Golfstrom schwächer fließt und weniger Wärme in den Nordatlantik transportiert.

Weil im tropisch-warmen Mittelatlantik mehr Wasser verdunstet, als durch Niederschlag ins Meer gelangt, ist das Oberflächenwasser ein wenig salziger als die unteren Schichten. Kalte Winde, die von Kanada und Grönland wehen, kühlen gelegentlich östlich von Labrador das Oberflächenwasser stark ab, so dass es dichter und schwerer wird. Wegen des höheren Salzgehalts und größeren spezifischen Gewichts sinkt es ab. Viele Millionen Kubikmeter Oberflächenwasser gehen somit in diesem Seegebiet in jeder Sekunde auf Tauchstation und fließen in der Tiefe ganz langsam bis zur Antarktis. Dort vereinigen sie sich mit dem antarktischen Tiefenwasserstrom, der fast achtmal so viel Kaltwasser von West nach Ost um die Antarktis herum transportiert. Südlich von Afrika beginnt er mit dem Aufstieg an die Oberfläche. Der Golfstrom ist also in den globalen Meerwasseraustausch eingebunden (Abb. 8).

Wenn aber in Nordamerika höhere Niederschläge fallen oder das Grönlandeis schneller schmilzt und entsprechend mehr Süßwasser in den Nordatlantik strömt,

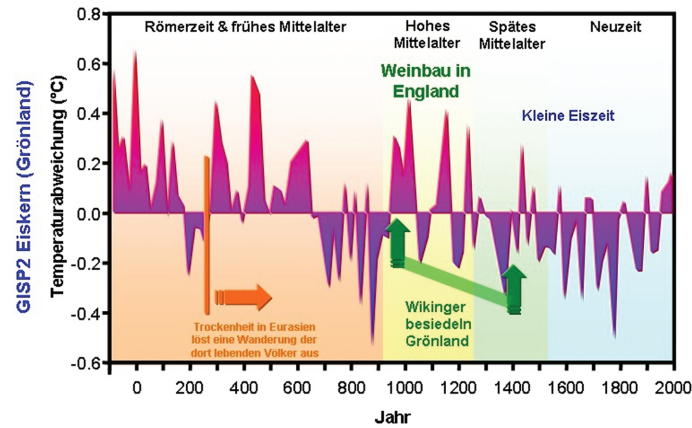


Abb. 9: Der Temperaturverlauf der letzten 2000 Jahre zeigt deutliche Wechsel wärmerer und kälterer Abschnitte, die teilweise entscheidenden Einfluss auf das Siedlungsgeschehen in Europa hatten (aus BERNER & STREIF 2001).

könnte es zu Änderungen in der atlantischen Zirkulation kommen. Denn das frische Wasser ist leichter als das Ozeanwasser, schwimmt als Schicht auf dem schweren Salzwasser und kann nicht in die Tiefe absinken. So ein Phänomen hätte entsprechende Auswirkungen auf das Klima in Mitteleuropa. Hätte das Oberflächenwasser nur zwei Promille weniger Salzgehalt, würde es bei einer Abkühlung auf den Gefrierpunkt an der Oberfläche bleiben. Es gäbe keinen Austausch zwischen den verschiedenen Wasserschichten. Dann würde sehr viel weniger warmes Wasser aus tropischen und subtropischen Breiten nach Norden fließen.

Genau dieses scheint gegen Ende der bislang letzten Eiszeit geschehen zu sein. Damals flossen die Schmelzwässer des nordamerikanischen Inlandeises über den Sankt-Lorenz-Strom in den Nordatlantik statt über den Mississippi in den Golf von Mexiko. Der Salzgehalt des nordatlantischen Oberflächenwassers sank so stark, dass kein neues Tiefenwasser mehr gebildet wurde. Der Golfstrom bog damals im Mittelatlantik nach Süden um. Große Teile des Nordatlantiks vereisten. Rund tausend Jahre dauerte dieser Zustand. Später nahm der Golfstrom dann seine ungefähre heutige Position ein, und solche Wechsel gab es offenbar öfter: Während der günstigen Klimabedingungen zu Beginn der mittelalterlichen Warmzeit bauten beispielsweise die Wikinger unter Erich dem Roten um das Jahr 985 ihre Siedlungen an der Südwestküste von Grönland auf, die beinahe 500 Jahre bestanden. An den grünen Fjorden betrieben sie Viehzucht, sie ernteten Heu für das Winterfutter der Tiere und bauten sogar Dörfer und Kirchen bis nachweislich zum Jahre 1408. Verstärktes Auftreten von Stürmen in Verbin-

dung mit der Tiefendurchmischung des Fjordwassers kumulierte dann aber im Übergang von der mittelalterlichen Warmzeit in die „Kleine Eiszeit“, in der Phase, als die Wikinger aus Grönland wieder verschwanden (Abb. 9).

Die Wikinger fanden also im Jahre 874 die damals grüne Insel Grönland. Wegen des Klimas war sie zumindest an ihren südlichen Küsten gut geeignet für Ackerbau und Viehzucht. Auf dieser Insel siedelte man dann einige Jahrhunderte, bis der Klimawandel – diesmal ohne das Zutun des Industrie-Menschen mit seinen Kraftwerken und Luftverkehr – dem ein Ende bereitere und die Abkühlung zu jenen Eisschichten führte, deren Abschmelzen wir heute diskutieren.

Muss sich jetzt die Menschheit rüsten für eine globale Erwärmung um zwei Grad, die Menschen in vielen Fachkreisen als unabwendbar gilt, oder sind es gar volle fünf Grad, so wie vor 8000 Jahren im holozänen Klimaoptimum des Atlantikums, als unsere Waldbäume aus ihren südlich-mediterranen Refugien wieder in Mitteleuropa einwanderten?

9. Unser Klima im Holozän

Die Analyse der Dynamik des Klimas unserer Erde wird also immer komplexer, weil wir heute nicht nur physikalische, chemische und geologische, sondern inzwischen auch biologische Prozesse berücksichtigen müssen. Dies impliziert zum Beispiel, dass Klimamodelle, die sinnvoll für die Rekonstruktion der Vergangenheit und für die Prognose der künftigen Entwicklung verwendet werden sollen, die Biosphäre nicht nur als statische Randbedingung, sondern als dynamische Prozesskomponente berücksichtigen müssen, wie es Volker Mosbrugger (2003) anmahnt: dieses ist jedoch bislang in den meisten großen Klimamodellen nicht realisiert. So erscheinen unter diesem Blickwinkel auch die Phänomene und Prozesse eines „anthropogenen Klimawandels“, wie es zu Beginn kurz skizziert wurde, unter einem etwas anderen Licht: Die Rolle des Menschen im System Erde erweist sich vielleicht als nicht so einmalig – daraus soll aber auch nicht eine Verharmlosung der aktuellen menschlichen Eingriffe im System „Erde“ abgeleitet werden.

Es gibt offenbar keinen Zweifel, dass das Klima der Erde sich zur Zeit in einer Phase schnellen Wandels befindet. Aber es gibt überall die regionalen Unterschiede: Den Rekord beim Schmelzen der Gletscher hält derzeit Südamerika: Der gewaltige Calvo-Gletscher im südlichen Eisfeld Patagoniens schrumpft zusehend – wie fast alle Eisschilde Südamerikas. Das berichtete jüngst die Forschergruppe um Eric Rignot (2003) aus Pasadena in Kalifornien. Die insgesamt 63 Gletscher Süd- und Nordpatagoniens sind mit einer Gesamtfläche von mehr als 17000 Quadratkilometern die größten Eispanzer auf der Südhalbkugel außerhalb der Antarktis (Abb.10). Demnach hat sich das Abschmelzen dieser



Abb. 10: Der Glaciar Perito Moreno, der Argentinien mit Chile in den Patagonischen Anden verbindet, gehört zu den größten Gletschern der Erde. Sein mächtiges Eis erscheint auf Grund der Absorption des Lichtes leicht bläulich.

Gletscher seit 1968 im Mittel mehr als verdoppelt. Auch zahlreiche Alpengletscher haben seit der Zeit schon zwei Drittel ihrer Eismasse verloren, das schreiben die Glaziologen, die im österreichischen Ötztal nahe der Grenze zu Italien am Vernagtferner, einen Gletscher zwischen 2750 und 3600 Metern Höhe, seit knapp 40 Jahren dort die jährliche Massenbilanz des Gletschers, also die Summe aus Zuwachs und Abfluss bestimmen und messen. Ähnliches gilt für die Gletscher von Jungfrau (4158 Meter), Mönch (4107 Meter) und Eiger (3970 Meter) im Berner Oberland. So etwas droht auch den anderen Alpengletschern. Die letzten fünf Gletscher in den Bayerischen Alpen beispielsweise, darunter auch der Schneeferner an der Zugspitze (2962 Meter), werden so in den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren abgeschmolzen sein, wenn die Temperaturentwicklung so weitergeht.

Ein weiterer dramatischer Temperaturanstieg, so schlussfolgern viele, ist heute also nicht zu befürchten. Allenfalls gehe die Erde einer solchen Warmzeit entgegen, die dem „Mittelalterlichen Klimaoptimum“ entspricht. In dieser von 700 bis 1300 nach Christus währenden Periode war es global rund ein Grad wärmer als heute. Die Wikinger besiedelten damals Grönland und betrieben Ackerbau und Viehzucht, und sie blieben dort nachweislich bis zum Jahre 1408. In England wurde zu jener Zeit Wein angebaut (Abb. 9). Einen Umschwung brachte die „Kleine Eiszeit“ von etwa 1450 bis 1780, als das Weltklima um rund ein Grad abkühlte, eine Zeit, in der die Themse in London und die Lagune von Venedig regelmäßig

zufroren. Es kam in dieser Zeit zu Missernten, die vielerorts zu Hungersnöten führten, und das Vorrücken des Eises zwang die Wikinger am Beginn des 15. Jahrhunderts zur Aufgabe ihrer grönländischen Siedlungen. Den Tiefpunkt dieser Kaltzeit bildete das sogenannte Maunder-Minimum von 1645 bis 1720. In dieser Phase, so berichten zeitgenössische Astronomen, habe die Sonne keinerlei Flecken gezeigt. Was war die Ursache dieser Abkühlung? Vulkantätigkeit scheint ebenfalls bedeutend zu diesem Wandel beigetragen zu haben. Der Ätna beispielsweise, der höchste Vulkan Europas, brach im 17. Jahrhundert häufiger aus als in jedem anderen Zeitalter: Zwischen 1603 und 1620 brodelte er ständig, und im Jahre 1669 fand die verheerendste aller bislang bekannten Eruptionen statt; es folgten die strengen, bitterkalten Winter um 1700, in der Phase des neuzeitlichen Gletscherhochstandes in den Alpen. Vielleicht haben sich damals die vulkanischen und die solaren Aktivitäten addiert - neue Untersuchungen und Hypothesen gehen auch verständlicherweise in diese Richtung.

Noch eines sollten wir in Erwägung ziehen: Wenn man an Johann Peter Hebel (1760-1826) erinnert, der vor genau zweihundert Jahren im Jahre 1807 zu berichten wusste: *„Der warme Winter von ... 1806 auf ... 1807 hat viel Verwunderung erregt und den armen Leuten wohlgetan; der und jener ... wird ... als alter Mann ... seinen Enkeln erzählen, dass ... man Anno 6, als der Franzos in Polen war, zwischen Weihnachten und Neujahr Erdbeeren gegessen und Veilchen gerochen habe. Solche Zeiten sind selten, aber nicht unerhört, und man zählt in den alten Chroniken seit siebenhundert Jahren achtundvierzig dergleichen Jahrgänge ... 1289 ... war es so warm, dass die Jungfrauen um Weihnacht und am Dreikönigstag Kränze von Veilchen, Kornblumen und andern trugen ... 1420 war der Winter und das Frühjahr so gelind, dass im März die Bäume schon verblühten. Im April hatte man schon zeitig Kirschen und der Weinstock blühte. Im Mai gab es schon ziemliche Trauben-Beerlein ... Im Winter 1538 konnten sich auch die Mädchen und Knaben im Grünen küssen, wenns nur mit Ehren geschehen ist; denn die Wärme war so außerordentlich, dass um Weihnacht alle Blumen blühten. Im ersten Monat des Jahres 1572 schlugen die Bäume aus, und im Februar brüteten die Vögel. Im Jahre 1585 stand am Ostertag das Korn in den Ähren ... 1617 und 1659 waren schon im Jänner die Lerchen und die Trosteln lustig ... 1722 hörte man im Jänner schon wieder auf, die Stuben einzuheizen. Der letzte ungewöhnlich warme Winter war im Jahre 1748. Summa, es ist besser, wenn am St.-Stephans-Tag die Bäume treiben, als wenn am St.-Johannis-Tag Eiszapfen daranhängen.“*

Vergessen scheint manchmal auch, dass es zur Römerzeit warm genug war, um fast ganz Europa in Sandalen ohne Beinkleider zu erobern. Offenbar war es auch während der sogenannten „Kleinen Eiszeit“ von 1450 bis 1780 auf der Nordhalbkugel auch nicht überall durchgehend kälter und zwischendrin gab es warme Klimaphasen, wie wir gerade aus den Archivalien gesehen haben. Es muss also noch andere klimarelevante Prozesse und Ursachen geben:

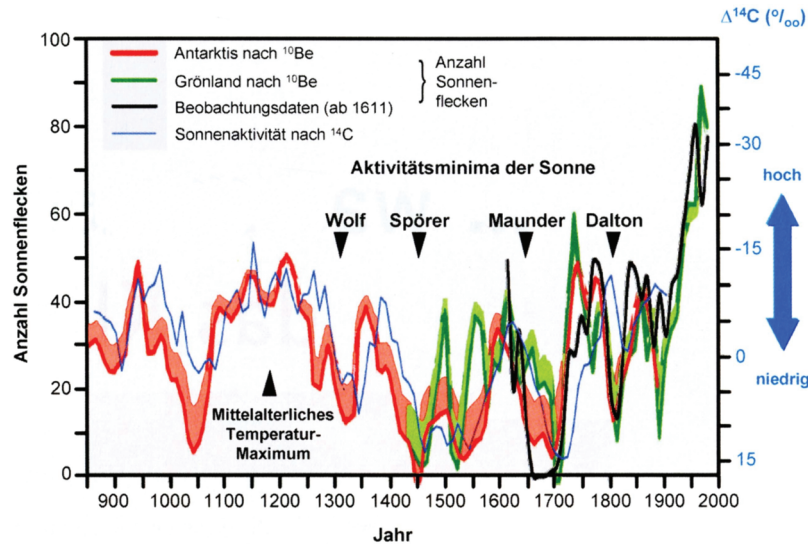


Abb. 11: Rekonstruktion der Sonnenaktivität während der letzten 1150 Jahre über verschiedene Proxydaten aus Eiskernen (rot, grün), Holz (blau) und direkte Beobachtungsreihen, z. B. auf der Basis von Sonnenflecken (schwarz) (aus BERNER & STREIF 2001).

Damit werden erneut wichtige Klimamotoren in den Blickpunkte gerückt: Vulkane und die schon genannte Sonne. Diese weist in der Tat einige sich teilweise überlagernde Aktivitätszyklen, eben die Sonnenflecken auf: Wir kennen schon die Schwabe-Zyklen von 11 Jahren, weitere gibt es im Ablauf von 22, 80 beziehungsweise 90 und von rund 200 Jahren. Diese Wechsel in der Sonnenaktivität, sagen die „Treibhaus-Zweifler“, lassen auch das Klima „Achterbahn“ fahren. Sie belegen ihre These mit Klimadaten aus der Vergangenheit, welche zeigen, dass die Flecken und der Sonnenwind der Flares – ein von unserem Zentralgestirn weggeschleudert Strom elektrisch geladener Teilchen – das Klima in kurzen, nur Jahrzehnte währenden Schwüngen steuern (Abb. 11).

Vor allem die sogenannten „Solaren Zyklen“ erlangen in der aktuellen Paläoklimaforschung immer größere Bedeutung: Der neue Nachweis eines 11-jährigen solaren Schwabe-Zyklus in den Seesedimenten des Schleinsees in Süddeutschland und des Belauer Sees in Schleswig-Holstein von FREUND et al. (2003) zeigt die Wirkung derartiger Einstrahlungsänderungen im Ablauf eines Sonnenfleckenzyklus auf die Lebensräume der Erde. Wir finden solche Zyklen auch abgebildet in Baumringdichten, in laminierten, das heißt jahreszeitlich geschichteten Meeresablagerungen und in Eislagen auf allen Kontinenten sowie in der Elatina-Formation in Australien sogar seit dem Präkambrium.

Man vermutet jetzt, die „Kleine Eiszeit“ und die seit Mitte des 19. Jahrhunderts beobachteten Temperaturanstiege seien durch diesen Steuermechanismus ausgelöst, von dem allerdings unklar ist, wie er funktioniert. Neben der Sonnenaktivität ändert sich auch die Erdbahn um die Sonne, was sich ebenfalls auf das Klima auswirkt. Zusammengenommen lassen auf astronomischen Faktoren beruhende Klimamodelle erkennen, dass wir am Beginn der genannten langen Warmzeit stehen. Wie gesagt, erst in einigen zehntausend Jahren soll sich das Klima wieder stark abkühlen – unabhängig davon, wie sehr der Mensch die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre durch die Verbrennung fossiler Reserven erhöht. Wir erwärmen vielleicht unsere Erde durch „Abgase“ tatsächlich – ob wir damit aber einer potentiellen natürlichen Klimavariante Vorschub leisten – oder ob wir uns nur im Rahmen der bekannten „solaren“ Klimaveränderungen im Zentrum einer „Sonnenfleckenaktivität“ befinden, wird sich in naher Zukunft herausstellen. Bis dahin sollten wir aber energiesparende Technologien entwickeln und einsetzen, um nicht zuletzt auch in den armen Ländern der Erde wirtschaftliche Entwicklungen mit höherer Energie-Effizienz zu ermöglichen. Mit noch größerem Nachdruck könnten erneuerbare Techniken von der Wasserkraft bis zur Sonnen- und Erdenergie genutzt werden. Nutzung und Gebrauch des Wassers werden in diesem Zusammenhang erdweit wohl immer mehr zunehmen und an Bedeutung gewinnen.

10. Klimaschutz

Wir kennen jetzt den Preis des Unberechenbaren: Es geht um 5500 Milliarden oder 5.5 Billionen Euro. Die globale Erwärmung wird zum „Größten Marktversagen aller Zeiten“ deklariert und dennoch soll uns ausgerechnet die Weltwirtschaft vor den Folgen des Versagens retten, wenn wir uns die „Dritte industrielle Revolution“ unseres derzeitigen Bundesministers für Umwelt in Erinnerung rufen.

Das angebliche Ziel von Kyoto, Treibhausemissionen auf 550 ppm zu stabilisieren, bedeutet eine globale Erwärmung auf noch mehr als zwei Grad Celsius. Ist aber diese Schwelle überschritten, können ungewisse, vielleicht nicht mehr beherrschbare Ereignisse eintreten. Wir erleben also ein globales Naturexperiment, dessen Ausgang wir nicht kennen.

Das im Dezember 2006 vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven in Aussicht gestellte Ende des arktischen Sommereises für das Jahr 2080 und die Aussicht auf einen eisfreien Nordpol sowie auf ein annäherndes packeisfreies Polarmeer erzielte natürlich eine große Breitenwirkung in der Öffentlichkeit: Nach zahlreichen Computersimulationen verringerte sich jedoch die Ausbreitung des Meereises innerhalb von zehn Jahren von sechs auf zwei Millionen Quadratkilometer. Selbst im Winter werde das Eis massiv schmelzen, die mittlere Eis-

dicke von vier auf weniger als einen Meter schrumpfen. Die Schmelzrate würde sich damit gegenüber dem heutigen Trend auf das Vierfache beschleunigen. Ursache für diesen plötzlichen Wärmeschub ist ein Effekt, den man bisher nicht ausreichend berücksichtigt hatte: die zunehmende Wärmeaufnahme des Meeres durch abnehmende Albedo: Da das Wasser im Laufe der Klimaerwärmung sukzessive weniger Meereis enthält, nimmt die Rückstrahlung an Sonnenstrahlung in den Weltraum ab, zugleich nimmt das dunklere Meer zunehmend mehr Wärme auf – eine positive Rückkoppelung, die das Abschmelzen beschleunigt. Allerdings tut es das in dem berechneten Ausmaß auch nur dann, wenn sich der Ausstoß an Treibhausgasen wie in den üblicherweise heute genutzten „*Business-as-usual*-Modellen“ bis zum Ende des Jahrhunderts verdoppeln würde und wenn andere, möglicherweise neutralisierende Rückkoppelungen vernachlässigt werden. Wenn sich die Menschheit schließlich zu durchaus realistischen Emissionsreduktionen entschließen und den Anstieg der Treibhausgase auf ein Drittel begrenzen könnte, würde dies dazu führen, dass das Arktisklima weniger abrupt kippe. Die Frage nun ist, was wir mit einer einseitigen Kohlendioxyd-Minderungsstrategie ausrichten, wo doch die vom Menschen erzeugte Menge nur drei bis vier Prozent des gesamten produzierten Kohlendioxyds ausmacht. Zudem ist erneut darauf hinzuweisen, dass nicht nur Kohlendioxyd, sondern auch Wasserdampf, der ebenfalls bei Verbrennung entsteht, ein Treibhausgas ist. Ohne die beiden Gase in der Atmosphäre hätten wir jetzt eine globale Mitteltemperatur von minus 18 Grad Celsius. Ohne die beiden Gase käme auch keine Photosynthese, also Pflanzenwachstum, zustande.

Wer also meint, wir könnten das Klimageschehen heute vollständig kennen und begreifen, unterschätzt die große Zahl von Variablen und an Wechselwirkungen im Klimageschehen, die wir bisher kennen gelernt haben. Wir können das Klima unseres Planeten derzeit nur in Szenarien berechnen und durchspielen, eine genaue Vorhersage ist noch nicht möglich. Wir haben auch bislang gesehen, dass Klimaänderungen was ganz natürliches sind im System Erde, und es scheint, dass wir Menschen dabei ein aktiver Faktor sind. Das Wort „Klimaschutz“ verdeutlicht unfreiwillig wegen des systembedingten Klimawandels sogar eine grundlegende Ignoranz, wie dies auch REINHARD HÜTTL (2008) formuliert: Nicht wir müssen das Klima schützen, sondern wir müssen uns vor möglichen Klimaänderungen, auch den von uns selbst verursachten, schützen.

11. Klimavorhersagen

„Kohlendioxidverschmutzung in China, man kann sie riechen, sehen und fühlen“, schreibt die F.A.Z. am 15. März 2007; daneben zeigt ein Bild starken Smog und rußigen Schornsteinqualm. Solche Bilder mit ähnlichen Sätzen werden derzeit massenhaft in den Medien präsentiert. Kohlendioxid ist aber ein

farb- und geruchsloses Gas. Es ist schwerer als Luft und wie wir jetzt wissen mit 0,036 Prozent deren Bestandteil. Man kann Kohlendioxid also nicht sehen, da es transparent ist, obendrein ist es geruchslos. Außerdem ist es die Kohlenstoffquelle der Pflanzen für ihren Zellaufbau. Durch das Blattgrün werden unter Einwirkung des Sonnenlichts aus dem Kohlendioxid Stärke und Zucker aufgebaut, wobei Sauerstoff frei wird, den wir dann einatmen können. Kohlendioxid ist also ein absolut lebensnotwendiges Gas für Pflanzen, Tiere und Menschen. Riechen kann man aber Schwefeldioxid, das bei der Kohleverbrennung frei wird. Davor dürfen die Chinesen sich fürchten, denn Schwefeldioxid wirkt auf die Atemwege. Es genügt ein Milligramm in einem Kubikmeter Luft, um einen Menschen zu töten. Im Jahre 1952, als alle Haushalte noch mit Kohle heizten, starben in London bei einem starken Dauersmog 4000 Menschen. Vom Schwefeldioxid und den in China jahrelang brennenden Tagebauflözen erwähnt der Artikel der FAZ leider nichts.

Entweder das Kohlendioxid ist die entscheidende Ursache, dann hätte es die Warm- und Eiszeiten nicht geben dürfen, oder es gibt weitere sehr gewichtige Einflussfaktoren. Die sind aber in den Klimamodellen unterschätzt beziehungsweise ignoriert. Man muss auch zur Kenntnis nehmen, dass nur etwa drei Prozent des jährlich in die Erdatmosphäre emittierten Kohlendioxids vom Menschen stammen, 97 Prozent sind natürlichen Ursprungs. So weit zu unserer eigenen Wichtigkeit. Interessant wäre auch die Beantwortung der Frage, warum dann, wenn es in der langen Klimavergangenheit unserer Erde überhaupt einmal signifikante Kohlendioxid-Konzentrationsanstiege gab, diese zumeist im Anschluss an Warmperioden, teilweise mehrere hundert Jahre danach auftraten und nicht zu deren Beginn. Bis heute verstehen wir nicht, warum die Wikinger in Grönland siedeln konnten, es dann aber dafür zu kalt wurde. Jene Periode, beginnend etwa um 1000 nach Christus, wird übrigens „Klimaoptimum“ genannt, und entspricht recht genau jenem Klima, dem wir uns zur Zeit nähern.

Wenn man weiß, dass jede Woche in China ein Kohlekraftwerk in Betrieb genommen wird, dort allein viele Milliarden Tonnen Kohlendioxid emittiert werden und Deutschland mit Brüssel darüber streitet, ob 450 oder 470 Millionen Tonnen emittiert werden dürfen, dann zeigt das, wie die Politiker heute arbeiten, denn China und Indien waren gar nicht durch Kyoto betroffen, denn beide Länder ratifizierten nicht das Kyoto-Protokoll. Einigen Zeitungen im März 2007 ist die Einsparung von 0,45 Millionen Tonnen Öl durch alle Solarheizanlagen in Deutschland durchaus einige Schlagzeilen wert, das sind etwa eine Million Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. Die Atomkraftwerke in Deutschland reduzieren die ansonsten anfallende Kohlendioxid-Menge um einen etwa einhundertmal größeren Wert. Deutschland baut seine Atomkraftwerke zurück, Aus Frankreich wird Atomstrom importiert. Keiner der befragten „Forscher“ hält den Ausbau der Atomenergie für eine Option. Selbst in Deutschland darf aber zumindest das Wort „Atomkraft“ wieder aussprechen.

Seit Industrialisierungsbeginn vor mehr als 150 Jahren ist also der Temperaturmittelwert um etwa 0,6 Grad Celsius global gestiegen. Wir nähern uns den Klimaoptimum-Bedingungen des Mittelalters. Was ist daran denn so falsch? Die letzte Kaltzeit brachte den Höchststand der Gletscher, eine gebietsweise Verringerung wird zu verkraften sein. Das Gebiet der Seriosität wird allerdings verlassen, wenn zu Klimagipfeln fliegende „Klimaforscher“ oder gar die deutsche Regierung Gelder zum „Ausgleich der Kohlendioxid-Emission“ ausgeben. Das erinnert schon stark an das Mittelalter mit dem Ablasshandel durch Tetzeln, doch wurde damals wenigstens noch das eigene Geld verwendet. Auf jeden Fall sollten wir uns aber davor hüten, mit wirtschaftszerstörenden Maßnahmen zu versuchen, den stets gegebenen natürlichen Klimawandel aufhalten zu wollen.

12. Ausklang

Im gesamten Quartär, das die letzten 2.6 Millionen Jahre der Erdgeschichte umfasst, war das Erdklima durch einen beständigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten geprägt. Diese Klimaschwankungen, die offenbar entscheidend durch langfristige, zyklische orbitale Schwankungen der Erdbahnparameter verursacht wurden, hatten auch entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Menschen. Hierbei sind grundsätzlich zwei wichtige Auswirkungen dieser Klimawechsel zu beachten: die großräumige Verschiebung von Lebensräumen und die Veränderung der Vegetation mit entsprechenden Auswirkungen auf das Nahrungsangebot. Die Ausbreitung nahrungsreicher Lebensräume während günstiger Klimaphasen hat vermutlich zu der beschriebenen passiven Mitwanderung früher Hominidenpopulationen geführt, während die Schaffung isolierter Lebensräume bzw. reichstrukturierter Landschaften in ungünstigen Klimaphasen die geographische Isolation von Populationen, somit also auch die Artneubildung förderte. Das zeigen gerade ganz besonders die auf der indonesischen Insel Flores von australischen Anthropologen um Peter Brown (2004) entdeckten, etwa 18000 Jahre alten Fossilien kleinwüchsiger, pygmäenartiger moderner Menschen vom Typ *Homo floresiensis*, die offenbar Zwergelöfanten der Gattung *Stegodon* jagten. Zwergwuchs auf Inseln ist ein weit bekanntes Phänomen der Evolution. Die Flores-Menschen sind inzwischen ausgestorben – ihre vergangene Existenz ist aber ein wichtiges Bindeglied für das Verständnis der adaptiven Radiation der Menschen auf der Erde. Eine der entscheidenden Fähigkeiten des Menschen, die er innerhalb der biologischen Evolution neben dem aufrechten Gang erwarb, ist allerdings die Abkoppelung aus seinen direkten Umweltabhängigkeiten, denn heute ist der Mensch – wie erwähnt – in der Lage, nahezu alle Bereiche der Erde zu besiedeln und diese für sich zu gestalten.

Wenn langfristig wirksame Klimawechsel nachweislich die Entwicklung der Menschheit beeinflusst haben, so stellt sich die Frage, ob auch in den jüngsten

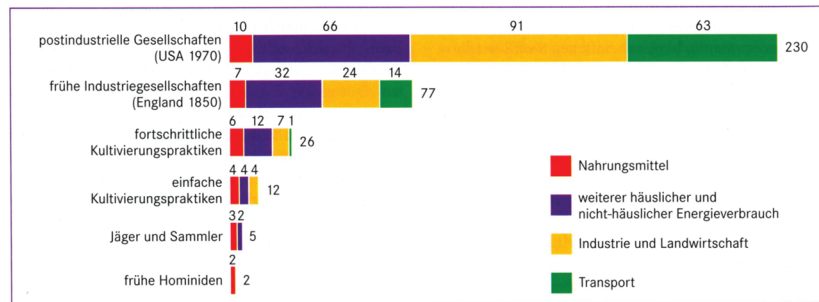


Abb. 12: Gesamter und anteiliger Energieverbrauch in 10^3 Kilokalorien pro Person und Tag in unterschiedlich entwickelten Gesellschaften (aus Gebhardt et al. 2007).

Abschnitten der Erdgeschichte entsprechende Zusammenhänge zwischen Siedlungs- und Klimaentwicklung bestehen. Wie bereits ausgeführt, hat sich der Mensch über Jahrtausende an die Natur angepasst, sich aber auch aus der Natur bedient. Die Brandrodung und vor allem das Verbrennen fossiler Brennstoffe lassen seither das Kohlendioxid in der Atmosphäre ansteigen. Der aktuelle Energiekonsum vor allen der Industrienationen ist eine der Schlüsselfragen für die nachhaltige Entwicklung unseres Globus: Etwa sechs Milliarden Menschen verbrauchen derzeit rund sechs Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich – zu 90 Prozent aus fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas – und produzieren damit pro Jahr etwa 22 Milliarden Tonnen Kohlendioxid (CO_2), dem vielleicht wirksamen Faktor für den begonnenen globalen Klimawandel (Abb. 12).

Wir haben es schon gehört, natürliche Klimaänderungen können auch durch variierende Aktivitäten der Sonne hervorgerufen werden, denn die Sonne ist der Motor unseres Klimasystems. Früher ging man davon aus, dass die Sonne ihre Energie über lange Zeiträume gleichmäßig wie eine Glühbirne abgibt. Der Begriff Solarkonstante ist für diese Ansichtswiese ein typisches Beispiel. Heute weiß man, dass die Energieabgabe der Sonne nicht gleichmäßig verläuft, sondern Schwankungen unterworfen ist. Augenscheinlichstes Merkmal sind hierbei die wechselnden Häufigkeiten der erwähnten Sonnenflecken, die in bestimmte, unterschiedlich lange Zyklen der Sonnenaktivität eingebunden sind. Bekannt sind inzwischen der alle 11 Jahre auftretende Schwabe-Zyklus, der 20 Jahre währende Hale-Zyklus, der alle 80 bis 90 Jahre auftretende Gleißberg-Zyklus und der 180 bis 208 Jahre dauernde Seuss-Zyklus. Paläoökologische Nachweise solcher 11-jährigen Schwabe-Zyklen aus jahreszeitlich geschichteten Seesedimenten Süd- und Norddeutschlands haben jüngst Angelika Kleinmann und Holger Freund (2003) in dem bereits genannten Forschungsprojekt unseres Institutes erbracht.

Die Zusammenhänge zwischen Sonnenaktivität und Klima sind bekannt, allerdings weiß man über die direkten Steuerungsmechanismen bisher noch recht wenig. Die Sonnenfleckenzyklen bzw. die Anzahl der Sonnenflecken werden maßgeblich über das Magnetfeld der Sonne gesteuert. Zeiten maximaler Anzahl von Sonnenflecken sind zugleich Phasen eines starken solaren Magnetfeldes, jedoch einer geringen kosmischen Strahlung. Der durch das solare Magnetfeld induzierte stärkere Sonnenwind führt in der Erdatmosphäre normalerweise zu einer stärkeren Abschirmung, so dass kosmische Strahlung während solcher Phasen nur in geringerem Maße in die Erdatmosphäre eindringen kann. Für Zeiten geringer Sonnenfleckaktivität gelten genau die umgekehrten Bedingungen. Lange Zeit war die Verknüpfung zwischen Sonnenaktivität, kosmischer Strahlung und Erdklima unverstanden. Inzwischen wird die Möglichkeit diskutiert, dass Wechselwirkungen zwischen kosmischer Strahlung und Wolkenbildung bestehe. Diese Vermutung wurde inzwischen durch Satellitenmessungen bestätigt. Bei steigender Höhenstrahlung, wie sie in Phasen geringerer Sonnenaktivität zu verzeichnen ist, nimmt die Wolkenbildung in der Atmosphäre signifikant zu. Interessanterweise wird vor allem die Wolkenbildung in der unteren Atmosphäre angeregt, die für die Temperaturentwicklung der Erdatmosphäre von entscheidender Bedeutung ist. Durch zunehmende Bewölkung erhöht sich die Rückstrahlung der eingehenden Sonnenenergie signifikant, was zu Rückgängen der Temperaturen führt. Für derartige Änderungen der Wolkenbedeckung von ca. drei Prozent lässt sich ein Effekt von ca. 0.8 – 1.7 Watt pro Quadratmeter berechnen. Das ist ein durchaus signifikanter Wert, wenn man bedenkt, dass der gesamte Strahlungsantrieb durch Kohlendioxid seit 1750 nach Christus mit 1.56 Watt pro Quadratmeter geschätzt wird.

Solare Einflüsse auf das Erdklima sind demnach auch in jene Zeiten zurückzuverfolgen, die vor der Beobachtung und schriftlichen Aufzeichnung der Sonnenfleckaktivitäten liegen. Durch die kosmische Strahlung wird nämlich in der oberen Atmosphäre die Bildung von ^{14}C und ^{10}Be angeregt. Diese Isotope werden in organischem Material oder im Eis gespeichert und lassen sich heute durch die genannten Messmethoden nachweisen. Sie spiegeln somit als Proxydaten den Gang der solaren Aktivität wider. Ein Vergleich der am grönländischen Eiskern Grip 2 rekonstruierten Temperaturkurve mit der ^{14}C -Aktivitätskurve zeigt eine deutliche Korrelation zwischen Temperatur und solarer Aktivität und unterstreicht die Rolle der Sonne als Triebfeder der Klimaentwicklung. Weiterhin wird deutlich, dass die Sonne mehrfach längere Phasen äußerst geringer Sonnenfleckaktivität durchlaufen hat. Die wohl bekannteste dieser Phasen, das genannte Maunder-Minimum, korreliert in erstaunlicher Weise mit der schon erwähnten „Kleinen Eiszeit“, in der weltweit die Temperaturen um circa ein Grad Celsius zurückgegangen sind. Die heutige geologische Epoche seit etwa 12000 Jahren nach dem Abschmelzen der weichseleiszeitlichen Gletscher ist also das Holozän, wie wir oben gesehen haben. Neuerdings wird aber auch ein neuer Begriff für die Jetztzeit und die künftige Zeit geprägt, der

den dominierenden Einfluss des Menschen über alle natürlichen Systeme von Wasser, Boden, Luft sowie Tier- und Pflanzenwelt verdeutlichen soll: das Anthropozän. Manche halten den Begriff der Industrialisierung seit der Mitte des 18. und des 19. Jahrhunderts in dieser Hinsicht für einschneidend; manche aber, vor allem der renommierte amerikanische Klimatologe WILLIAM F. RUDDIMAN (2003), halten den Beginn der neolithischen Landnahme mit ihren ersten absichtlichen Brandrodungen der damaligen Urwälder vor etwa 8500 Jahren als wichtige Zeitmarke für den zunehmenden Einfluss des Menschen auf die Lebensräume der Erde.

Die Frage ist heute so wichtig, weil man sich über die Herkünfte des zunehmenden Kohlendioxid in der Atmosphäre im Klaren sein muss: Stammt er aus den Abholzungen und Brandrodungen der damaligen Wälder? Waldökosysteme sind auf vielfältige Weise in die globalen Kohlenstoffflüsse eingebunden und stehen in einem komplexen Austauschverhältnis mit der Atmosphäre. Zum einen entziehen sie der Atmosphäre mit der Photosynthese der Pflanzen ständig das CO_2 und bauen dies dauerhaft in die Biomasse der Blätter und letztendlich in das Holz der Waldbäume ein. So werden die Waldökosysteme schließlich bedeutsame Kohlenstoffspeicher der lebenden, terrestrischen Biosphäre. Über 50 Prozent der Pflanzenmasse der Erde ist reiner Kohlenstoff. Weltweit sind allein in den tropischen Wäldern etwa 380 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gebunden, der bei Rodung und Verbrennung als Kohlendioxid freigesetzt würde, und somit würde ein gigantisches Kohlenstoffdepot in die Atmosphäre verlagert. Gegenwärtig sind dies aber jährlich immer noch etwas mehr als 4 Milliarden Tonnen! Welche Rolle spielen dabei auch die Ozeane bei ihren CO_2 -Freisetzungen oder den Bindungen in den Calciumcarbonaten der Tiefsee? Auch die atmosphärischen Schwankungen des CO_2 nach den 100000- und den 41000-Jahreszyklen nach Milutin Milankovitch und die Gründe hierfür sind noch nicht ganz und umfassend in all ihren Wechselwirkungen verstanden. Es gibt also noch viele offene Fragen für die Zukunft.

13. Literatur

- BAHLBURG, H., & C. BREITKREUZ (2004): Grundlagen der Geologie. 2. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier München
- BARRY, R.G. & R.J. CHORLEY (2003): Atmosphere, Weather and Climate. 8. ed Methuen, London, New York
- BEHRE, K.-E. (1987): Meeresspiegelbewegungen und Siedlungsgeschichte in den Nordseemarschen. Vorträge d. Oldenburger Landschaft 17: 1-47.
- BEHRE, K.-E. (1991): Die Entwicklung der Nordseeküstenlandschaft aus geobotanischer Sicht. Ber. der Reinhold-Tüxen-Ges. 3: 45-58.

- BENDIX, J. (2004): Geländeklimatologie. Borntraeger, Stuttgart, Berlin.
- BERNER, U. & H. STREIF (Hrsg., 2001): Klimafakten: Der Rückblick – Ein Schlüssel für die Zukunft. 3. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart.
- BERNER, U. & H. STREIF (2004): Klimafakten. Der Rückblick – ein Schlüssel für die Zukunft. 4. Aufl. Borntraeger, Stuttgart.
- BETHGE, P., J. BLECH, R. FALKSOHN, T. HÜETLIN, J. KREMB, R. NELLES & G. TRAUBFETTER (2006): Wege aus der Treibhausfalle. Spiegel Nr. 45, S. 78-96, 6. November 2006.
- BLÜTHGEN, J. (1966): Allgemeine Klimageographie. 2. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin.
- BLÜTHGEN, J. & W. WEISCHET (1980): Allgemeine Klimageographie. 3. Aufl. De Gruyter, Berlin.
- BRADLEY, R.S. (ed. 1999): Paleoclimatology – reconstructing climates of the Quaternary. 2 ed. Int Geophys Ser 68, Academic Press.
- BROCKHAUS, FA. (2002): Biosphäre. Die Lebensräume der Erde. Band 1, FA Brockhaus, Leipzig, Mannheim.
- BROWN, P. et al. (2004): A new small-bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia. - Nature 431: 1055-1061.
- DEFANT, F. (1950): Theorie der Hang- und Seewinde. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. A 2: 404-425.
- ENDLICHER, W. (1991): Klima, Wasserhaushalt, Vegetation. Wissenschaftl. Buchges., Darmstadt.
- ERHARDT, E. (1953): Über den täglichen Gang des Windes im Gebirge. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. B 4: 431-450.
- FABIAN, P. (2002): Leben im Treibhaus. Unser Klimasystem – und was wir daraus machen. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- FLOHN, H. (1971): Tropical circulation pattern. Bonner Meteorol. Abh. 15.
- FONTSERÉ, E. (1949): La tramontane et le mistral de la côte catalane. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. B 1 : 127-137.
- FRANKENBERG, P. (1989): Sonnenstrahlung, Lufthülle und Klima. Praxis Geographie 6: 6-11.
- FREUND, H., A. KLEINMANN & G. SCHEEDER (2003): Kleinzyklische Klimaschwankungen im Holozän – erste Ergebnisse sedimentologischer, paläoökologischer und geochemischer Untersuchungen an jahreszeitlich geschichteten Sedimenten Nord- und Süddeutschlands. Terra Nova 6: 145-149.

- GEBHARDT, H., R. GLASER, U. RADTKE & P. REUBER (Hrsg., 2007): *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier, München.
- GEIGER, R. (1961): *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Vieweg, Braunschweig.
- GENTILI, J. (1958): *A geography of climate. – The synoptic world pattern*, Perth.
- GORE (2006): *An Inconvenient Truth*, Rodale, Emmaus, PA, USA.
- HEBEL, J. P. (1807): *Der Rheinische Hausfreund*. Insel Verlag, Hebel Band 4, S. 427.
- HELLMANN, G. (1923): *Über den Ursprung der volkstümlichen Wetterregeln (Bauernregeln)*. Sitzber Preuss Akad Wiss Berlin, math-naturw. Klasse 20: 148-170.
- HOYT, D.V. & K.H. SCHATTEN (1997): *The Role of Sun in Climate Change*. Oxford Univ. Press, Oxford.
- HUMBOLDT, AV. (1814) : *Atlas géographique et physique du Nouveau Continent fondé sur des observations astronomiques et des nivellements barométriques*. Paris.
- HUPFER, P. & W. KUTTLER (2006): *Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. 12. Aufl. Teubner, Wiesbaden.
- HÜTTL, R. (2008): *Was wissen wir vom Blauen Planeten?* ZEIT-Wissen Edition: Planet Erde 286-293, Spektrum. Akademischer Verlag, Heidelberg.
- IMBRIE, J., J.D. HAYS, D.G. MARTINSON, A. MCINTYRE, A.C. MIX, J.J. MORLEY, N.G. PISIAS, W.L. PRELL & N.J. SHACKLETON (1985): *The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine ¹⁸O record*. In: BERGER, A.L. et al (eds.): *Milankovitch and climate, Part1*. Reidel Publishing Comp.: 269-305.
- KESSLER, A. (1973): *Zur Klimatologie der Strahlungsbilanz auf der Erdoberfläche*. Erdkunde 17: 1-10.
- KLAUS, D. (1989): *Die planetarische Zirkulation*. Praxis Geographie 6: 12-17.
- KLINK, H.J. (1996): *Vegetationsgeographie*. 2. Aufl. Westermann, Braunschweig.
- KRAUS, H. (2004): *Die Atmosphäre der Erde – Eine Einführung in die Meteorologie*. 3. Aufl Springer, Berlin Heidelberg New York.
- LAMB, H.H. (1971): *Climate, Present, Past and Future*. Vol I London.
- LAMB, H.H. (1977): *Climate, Present, Past and Future*. Vol II London.
- LAMB, H.H. (1988): *Weather, Climate and Human Affairs*. Routledge.
- LAUER, W. & J. BENDIX (2004): *Klimatologie*. Westermann, Braunschweig.
- LAUER, W. & M.D. RAFIQPOOR (2002): *Die Klimate der Erde – eine Klassifikation auf der Grundlage der ökophysiologischen Merkmale der realen Vegetation*. Erdwissenschaftl. Forschg 40, Franz Steiner, Stuttgart.

- LOZÁN, J.L. (1998): Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen. Geo. Hamburg.
- MOSBRUGGER, V. (2003): Die Erde im Wandel – die Rolle der Biosphäre. Nat. wiss. Rundschau 56(7): 357-365.
- MÜLLER-JUNG, J. (2006): Am Abgrund: Europa glaubt an Umweltpolitik, Amerika verhöhnt sie. FAZ Nr. 258, S. 33, 6. November 2006.
- NAVEIRA-GARBATO, A.C., D.P. STEVENS, A.J. WATSON & W. ROETHER (2007): Short circuiting of the overturning circulation in the Antarctic Circumpolar Current. Nature 447: 194-197.
- PARRISH, J.T. (1998): Interpreting Pre-Quaternary climate from the geological record. Columbia Univ. Press, Columbia.
- PASENAU, H. (2002): Die Entstehung der Eiszeiten. In: FANSA, M. (Hrsg.): Vom Eise befreit – Geest. Reiche Geschichte auf kargem Land. Schriftenreihe des Landesmuseums für Natur und Mensch Oldenburg 25: 35-40.
- PASENAU, H., U. BLEICHE & M. FANSA (2002): Geest – Die Sesshaftigkeit. In: FANSA, M. (Hrsg.): Vom Eise befreit – Geest. Reiche Geschichte auf kargem Land. Schriftenreihe des Landesmuseums für Natur und Mensch Oldenburg 25: 63-69.
- PETERSEN, H. (1934): Extrem hohe Temperaturen und Föhn in Grönland. Meteor Zeitschrift 51: 289-296.
- PLASS, G.N. (1956): The carbon dioxide theory of climate change. Tellus 8: 140-154.
- POTT, R. (2003): Die Nordsee, Eine Natur- und Kulturgeschichte. C.H.Beck, München.
- POTT, R. (2005): Allgemeine Geobotanik, Biogeosysteme und Biodiversität. Springer, Berlin. Heidelberg, New York.
- POTT, R. & J. HÜPPE (2007): Spezielle Geobotanik, Pflanze – Klima – Boden. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- RAHMSTORF, S. (2002): Ocean circulation and climate during the past 120.000 years. Nature 419: 207-214.
- RICHTER, M. (2001): Vegetationszonen der Erde. Klett-Perthes, Gotha.
- RIGNOT, E., A. RIVERA & G. CASASSA (2003): Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise. Science 302: 434-437.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (1996): Bioclimatic map of Europe. Discurso investidura Dr. „honoris causa“ Universidad de Granada. Serv Publ Univ de Granada, Granada.
- RUDDIMAN, W.F. (2003): The anthropogenic green house era began thousands of years ago. Climate Change 61: 261-293.

- SALTZMANN, B. (2002): Dynamical Palaeoclimatology. Academic Press, San Diego.
- SCHMITHÜSEN, J. (1976): Atlas zur Biogeographie. Bibl. Inst. AG, Mannheim. Wien, Zürich.
- SCHNEIDER, S.H. (1990): Global Warming. Lutterworth Press, Cambridge.
- SCHÖNWIESE, C.D. (1996): Der anthropogene Treibhauseffekt in Konkurrenz zu natürlichen Klimaänderungen. Promet 25, 3: 53-61.
- SCHÖNWIESE, C.D. (2003): Klimatologie. 2. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- SCHWARZBACH, M. (1968): Neue Eiszeithypothesen. Eiszeitalter u. Gegenwart 19: 250-261.
- SMITH, T.M., & R.L. SMITH (2006): Elements of Ecology 6th Ed. Pearson Educ Inc publ, San Francisco.
- STORCH, HV. (1999): The global and regional climate system. In: Storch, Hv. & Flöser, G. (eds): Anthropogenic climate change: 3-36, Springer, Heidelberg.
- STORCH, HV., S. GÜSS & M. HEIMANN (1999): Das Klimasystem und seine Modellierung. Springer, Heidelberg.
- TRICAT, J. & A. CAILLEUX (1972): Introduction to climatic geomorphology. Longman, London, New York.
- WALTER, H. & H. LIETH (1967): Klimadiagramme – Weltatlas. Fischer, Jena.
- WANNER, H. (1986): Angewandte Geländeklimatologie. Erdkunde 40: 1-14.
- WEBB, D.J. & N. SUGINOHARA (2001): Vertical mixing in the ocean. Nature 409: 37.
- WEFEL, G., W.H. BERGER, K.E. BEHRE & E. JANSEN (2002): Climate development and history of the North Atlantic Realm. Springer, Heidelberg.
- WEISCHET, W. (2002): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. 6. Aufl. Teubner, Stuttgart.
- WELLMER, F.W. & J.D. BECKER-PLATEN (1999): Mit der Erde leben. Beiträge geologischer Dienste zur Daseinsvorsorge und nachhaltiger Entwicklung. Springer, Heidelberg.
- WITTIG, R. & B. STREIT (2004): Ökologie. UTB Basics, Ulmer, Stuttgart.